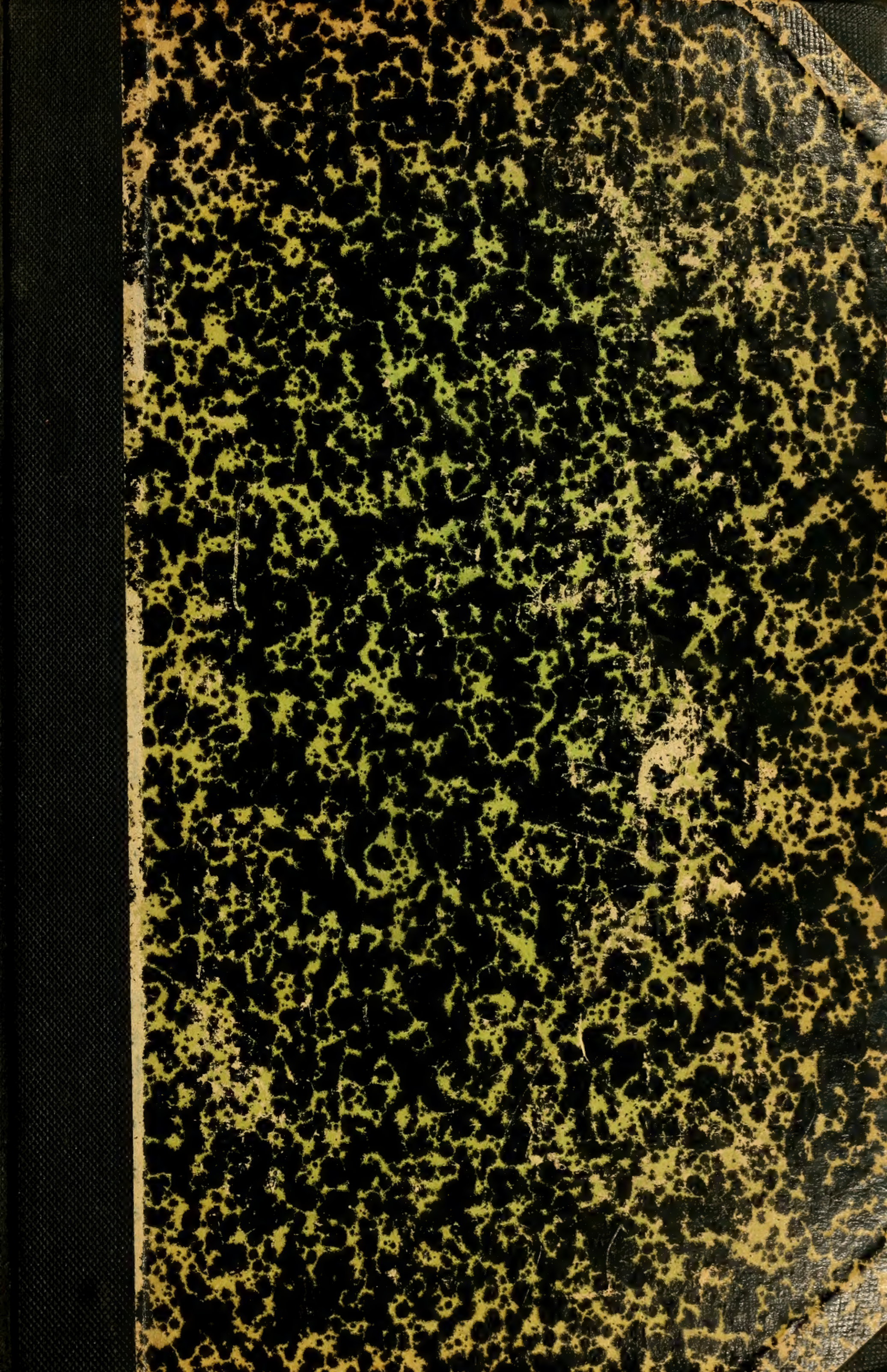
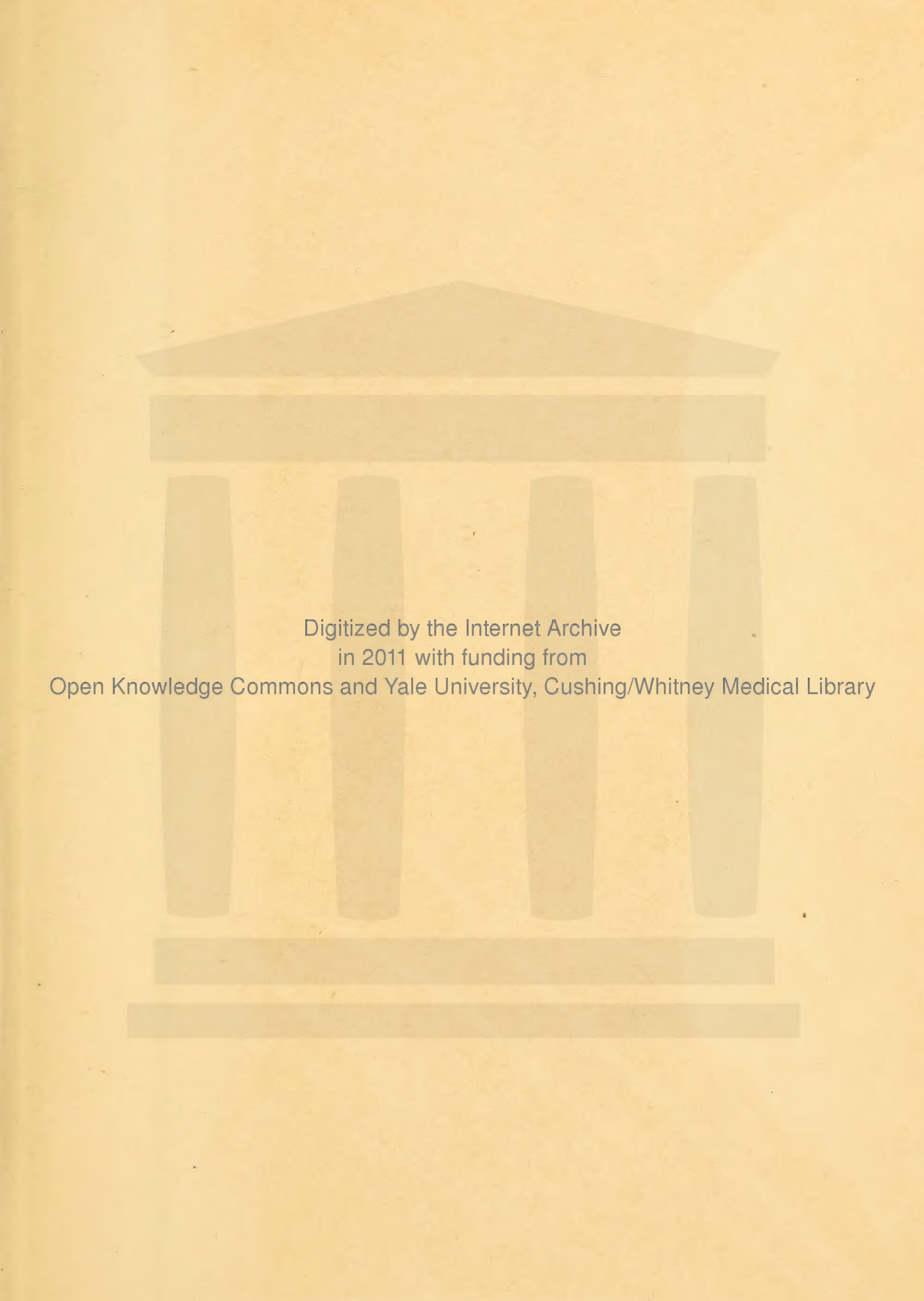
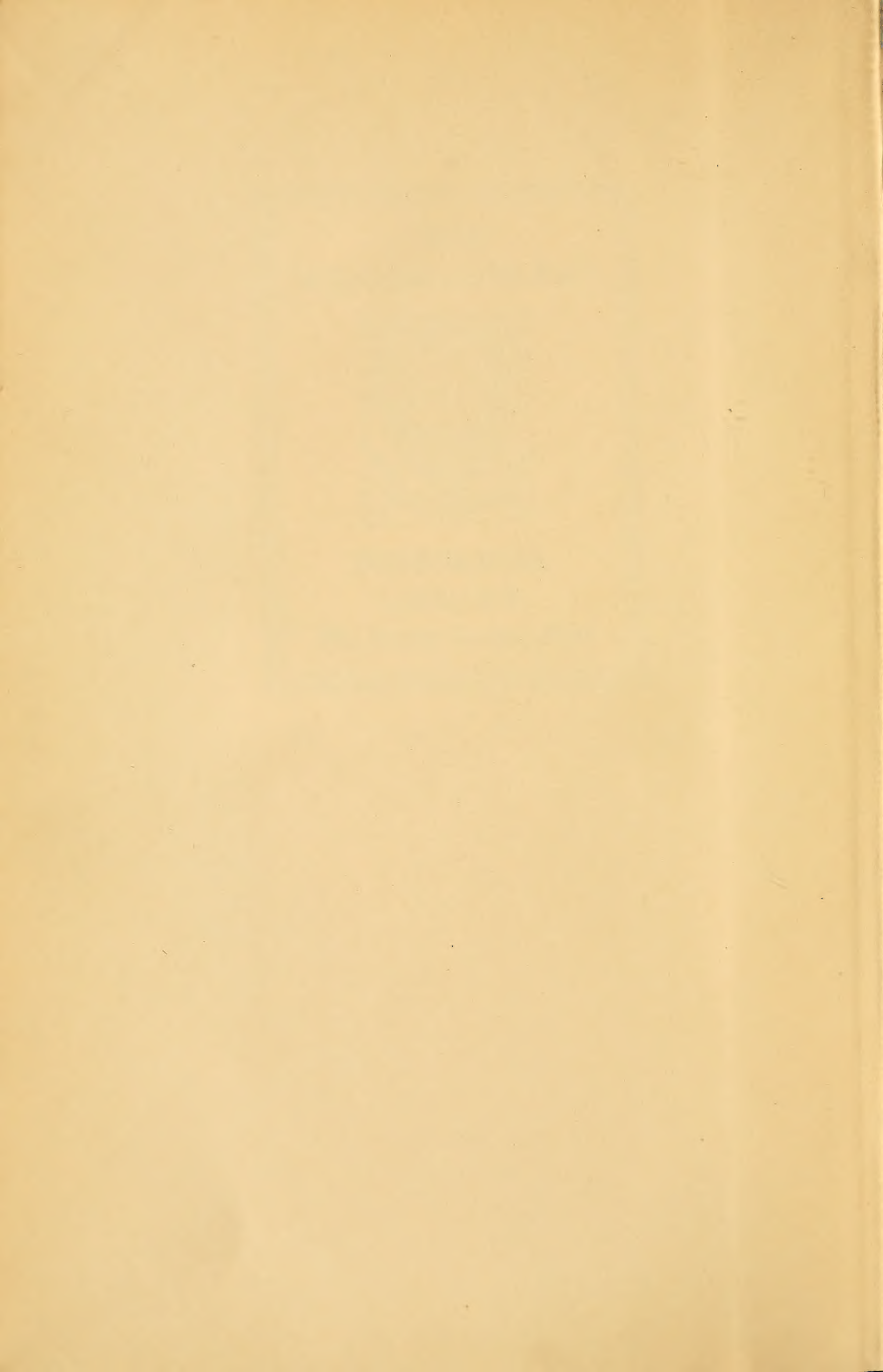



אורים
ותמים
LUX ET VERITAS





DIE

# GESCHICHTE DER PHYSIK.

DIE

# GESCHICHTE DER PHYSIK

IN

GRUNDZÜGEN

MIT

SYNCHRONISTISCHEN TABELLEN

DER

MATHEMATIK, DER CHEMIE UND BESCHREIBENDEN NATURWISSENSCHAFTEN

SOWIE

DER ALLGEMEINEN GESCHICHTE.

VON

DR. FERD. ROSENBERGER.

---

DRITTER THEIL.

GESCHICHTE DER PHYSIK IN DEN LETZTEN HUNDERT JAHREN.

---

BRAUNSCHWEIG,

DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN.

1887 – 1890.

# VORWORT.

Jede Darstellung einer Wissenschaft, sofern sie sich nicht mit einer blossen Aufzählung der Thatsachen begnügen will, muss entweder eine logisch-systematische oder eine historisch-kritische sein. Beide Arten der Darstellung stimmen darin überein, dass sie nicht allein das Materielle der wissenschaftlichen Erscheinungen geben, sondern vielmehr den Zusammenhang derselben aufdecken wollen, unterscheiden sich aber durchaus in der Weise, in welcher sie diesen Zusammenhang aufsuchen. Während die systematische Ordnung der wissenschaftlichen Errungenschaften nur die Beziehungen berücksichtigen darf, die mit dem inneren Wesen derselben selbst gegeben sind, muss die historische Schilderung in erster Linie äusseren Verbindungen folgen, die durch Personen, Zeiten und Orte, also der Wissenschaft fremde Elemente, hergestellt werden. Danach scheint es allerdings, als ob eine eigentliche Darlegung einer Wissenschaft nur in einer logisch-systematischen Gliederung gegeben und als ob eine historische Betrachtung derselben nicht so sehr dem eigentlich wissenschaftlichen als vielmehr einem specifisch geschichtlichen Interesse dienlich und nützlich werden könnte. Das Studium der Geschichte einer Wissenschaft würde danach, wie es ja vielfach auch üblich ist, von dem Studium der letzteren selbst gänzlich zu trennen sein und dem Fachmanne nur insofern etwas näher liegen, als die eingehendere Beschäftigung mit einem lebendigen Gegenstande meist auch ein lebhafteres Interesse an seinen vergangenen Daseinsformen einzuflössen pflegt.

In der Idee ist es auch wohl annehmbar, dass für eine rein deductive, in sich vollendete Wissenschaft eine solche logisch-syste-

matische Darstellung, vollkommen unabhängig von jeder Rücksicht auf die geschichtliche Entwickelung, gegeben werden könnte. Dafür ist aber anderseitig auch leicht einzusehen, dass bei den lebendigen Wissenschaften, die mit dem Fortschreiten unserer Erfahrung selbst immer weiter sich entwickeln, jede systematische Darstellung unvollendet und nach manchen Seiten hin auch einseitig bleiben muss. Wie keine fortlaufende Entwickelungsreihe von nur einem Punkte aus vollkommen aufzufassen ist, so wird auch keine lebendige Wissenschaft nur aus der Gegenwart begriffen werden können. Ebenso wie sich einem systematischen Ueberblicke der Wissenschaft überall Lücken zeigen werden, für deren Vorhandensein kein logischer Grund anzugeben, so werden sich an anderen Stellen überzählige Erfahrungen vorfinden, deren logische Einordnung noch keineswegs gelingen will. Reste alter, überwundener Anschauungen, rudimentäre Ueberbleibsel längst aufgelöster, von der Entwickelung überholter Systeme einerseits, wie die vorauseilenden Keime neuer, tiefer greifender Theorien, die empirisch gewonnenen Grundlagen neuer umfassenderer Systeme andererseits müssen sich nothwendig mit den herrschenden Lehren zu Widersprüchen zusammensetzen, welche keine logisch-systematische Arbeit in der Gegenwart noch aufzulösen vermag. Jede Zeit wird allerdings das Bestreben haben, die Wissenschaft ihrer Gegenwart in möglichster Vollendung und Widerspruchsfreiheit systematisch darzustellen; denn nur auf diese Weise wird dem logischen Bedürfnisse des menschlichen Geistes genügt. Deswegen ist aber eine solche Darstellung doch noch nicht der gesammten Wissenschaft adäquat, und sie birgt, wenn sie damit verwechselt wird, starke Gefahren der Einseitigkeit, des Dogmatismus und damit der Stagnation in sich. Diesen Gefahren kann wirksam nur begegnet werden durch die verständige Betrachtung der Geschichte der Wissenschaften, welche diese selbst in stetem Flusse zeigt und die Tendenz ihres Fortschreitens in offenbarer und sicherer Weise klarlegt; auch die logisch-systematische Fixirung der gegenwärtigen Wissenschaft kann mit richtigem Verständniss nur erfolgen, wenn sie in steter Rücksicht auf die Abhängigkeit der Gegenwart von der Vergangenheit geschieht.

Damit aber die so geforderte Annäherung der systematisirenden Darstellung an die historische wirklich möglich sei, dazu ist es

nothwendig, dass auch die letztere der ersteren so weit als möglich entgegen komme, d. h. dass die Geschichte der Wissenschaften nicht die Vergangenheit schon lange vor ihrer Vollendung abschliesse und so zwischen Vergangenheit und Gegenwart einen Abgrund lasse, der von der letzteren aus nicht überbrückt werden kann. In dieser Ueberzeugung und mit dem lebhaften Wunsche, jenen Abgrund oder, wenn man lieber will, jenen Grenzgraben so weit als möglich auszufüllen, habe ich vor nun länger als einem Jahrzehnt die vorliegende Arbeit unternommen. Dass ich damit eine sehr schwere, in ihrem vollen Umfange unmöglich zu lösende Aufgabe mir gestellt, habe ich gleich im Anfange ausgesprochen, und es ist mir das im Verlaufe meiner Arbeit auch keineswegs zweifelhafter geworden. Näher indessen auf die Schwierigkeiten hier einzugehen, die bei der Abfassung dieser Geschichte der Physik überwunden werden mussten oder auch nicht überwunden werden konnten, die mir sehr wohl bekannten Unvollkommenheiten meiner Arbeit zu entschuldigen oder dieselbe gegen allgemeine Ausstellungen hier speciell zu vertheidigen — das darf ich dem sachkundigen Leser und mir selbst wohl ersparen.

Nur in Betreff zweier Punkte muss ich einige Worte noch anfügen. Erstens fehlen diesem Theile des Werkes die synchronistischen Tabellen. Nicht sowohl darum, weil ich dieselben nun, der Neuzeit gegenüber, für gänzlich überflüssig gehalten; vielmehr vermisse ich dieselben hier, wo ich den Begriff der Physik der Masse des Stoffes wegen aufs Engste einschränken und sogar die meisten Probleme der Geophysik von der Behandlung ausschliessen musste, noch immer schmerzlich genug. Bei dem Mangel genügender Vorarbeiten hätte indessen die Ausarbeitung der Tabellen ein eigenes eingehendes Studium der Entwickelung der Mathematik, der Chemie und der beschreibenden Naturwissenschaften in den letzten hundert Jahren erfordert und das vermochte ich, in absehbarer Zeit wenigstens, nicht zu leisten. Der Leser möge mich deshalb gütigst entschuldigen. Der zweite der oben erwähnten Punkte betrifft das persönliche Element in der Geschichte der Physik. Der ganze Plan des Werkes brachte es allerdings schon mit sich, dass die Charakterisirung der Persönlichkeiten der wissenschaftlichen Arbeiter gegenüber der Schilderung der Entwickelung der Wissenschaft selbst mehr oder weniger zurückgesetzt wurde;

leider musste auch das jetzt noch mehr geschehen, als es sonst wohl in der Sache selbst gelegen hätte. Die biographischen Notizen, soweit sie noch lebende Physiker betreffen, sind unvollständig und fehlen vielleicht gerade da, wo sie am wünschenswerthesten gewesen wären. Selbst dem wissenschaftlichen Charakter der einzelnen Persönlichkeiten gerecht zu werden, habe ich zuletzt aufgeben müssen. Weder war es mir möglich, jeden Forscher auf physikalischem Gebiete in seiner ganzen Bedeutung richtig zu würdigen, noch darf ich mir einbilden, die Arbeiten aller Autoren bei jeder Erscheinung ihrem graduellen Werthe nach richtig angeführt und richtig charakterisirt zu haben. Gerade in diesen Beziehungen wären mir directe Mittheilungen zu Berichtigungen, Verbesserungen und Ergänzungen meiner Arbeit äusserst erwünscht und ich würde dieselben für eine später folgende Ergänzung oder neue Auflage des Werkes gewissenhaft benutzen.

Schliesslich bleibt mir noch die angenehme Pflicht, allen den Herren, welche mich bei der Vollendung des Werkes in liebenswürdigster Weise unterstützten — sei es durch Uebersendung eigener Abhandlungen, sei es durch Beihülfe bei der Aufsuchung des wissenschaftlichen Materials oder bei der Durchsicht der Correcturbogen — auch an dieser Stelle meinen innigsten Dank zu sagen.

Frankfurt a. M., September 1889.

**Dr. Ferd. Rosenberger.**

# Verzeichniss

derjenigen periodisch erscheinenden Schriften, welche bei der Ausarbeitung des vorliegenden Bandes vorzugsweise benutzt worden sind.

Sitzungsberichte (vor 1882 Monatsberichte) der Königl. Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1836 — x.

Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften zu Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Classe. II. Abtheilung. 1848 — x.

**Gren's Journal der Physik**, 1790 — 1794.

**Gren's neues Journal der Physik**, 1795 — 1798.

**Gilbert's Annalen der Physik**, 1799 — 1824.

**Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie**, 1824 – 1876.

**Wiedemann's Annalen der Physik und Chemie**, 1877 — x.

**Beiblätter zu Wiedemann's Annalen**, 1877 — x.

**Schweigger's Journal für Chemie und Physik**, 1811 — 1833.

Zeitschrift für Mathematik und Physik, begründet von Schlömilch und Witzschel, 1856 — x.

Journal für reine und angewandte Mathematik, begründet von Crelle, 1826 — x.

**Jahresbericht über die Fortschritte der Physik und Chemie von Berzelius** (übersetzt von Gmelin, Wöhler etc.), 1821 — 1848.

**Die Fortschritte der Physik, dargestellt von der Physikalischen Gesellschaft in Berlin**, 1845 — x.

**Jahrbuch der Erfindungen und Fortschritte auf den Gebieten der Physik und Chemie etc., begründet von Hirzel und Gretschel**, 1864 — x. (Enthält Nekrologe für jedes Jahr, die von uns durchaus benutzt worden sind.)

**Revue der Fortschritte der Naturwissenschaften, herausgegeben von Klein**, 1872 — x.

**Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, 1665 — x.

**Proceedings of the Royal Society. Abstract of the papers communicated to the R. S. of London**, 1849 — x.

**Transactions of the Royal Society of Edinburgh,** 1788—x.

Proceedings of the R. S. of Edinburgh, 1838—x.

The London, Edinburgh and Dublin philosophical Magazine and Journal of science, London, 1798—x.

Nature, a weekly illustrated journal of science, London, 1870—x.

The americain journal of science and arts by Silliman, New-Haven, 1820—x.

**Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences,** Paris, 1835—x.

Annales de chimie et de physique, Paris, 1789—x.

# Verbesserungen und Zusätze.

S. 49, Anm. [1]: Lies Annalen der Physik statt Annalen der Physik und Chemie.

S. 86, Z. 15: Lies Wells statt Well.

S. 94, Z. 1: Lies Revolution statt Revolutionen.

S. 99, Z. 4 v. u.: Lies umgekehrt proportional statt porportional.

S. 104, Z. 1: Lies Bicker statt Biker.

S. 136, Z. 14: Lies Trommsdorff statt Tromsdorf.

S. 145, Z. 1 v. u.: Lies Huyghens'schen statt Huygen'schen.

S. 149, Z. 5: Lies reflectirende statt reflectirte.

S. 150, Z. 6: Lies polarisirten statt polarisirenden.

S. 156, Anm. [4]: Das Todesjahr Biot's ist 1862.

S. 179, Anm. [3], S. 180, Anm. [1], S. 181, Anm. [2] und S. 182, Anm. [1]: Lies 1825 statt 1824.

S. 204, Z. 18: Lies $+ (K - 1)$ statt $- (K - 1)$.

S. 205, Z. 20: Lies beweglicher statt bewegter.

S. 207, Z. 2: Lies G. F. Pohl statt G. T. Pohl.

S. 218, Z. 7: Lies in der Zeiteinheit hindurchgeht.

S. 236, Z. 11 v. u.: Lies Baumgartner statt Baumgarten.

S. 249, Z. 18: Lies Pontécoulaut statt Pontecoulant.

S. 272, Z. 12 v. u.: Lies Hällström statt Hallström.

S. 290, Z. 13 v. u.: Lies 1826 statt 1816.

S. 311, Z. 9 v. u.: Lies Boussinesq statt Bussinesq.

S. 318, Z. 9 v. u.: Lies mehreren statt mehrere.

S. 332—354: W. Preyer hat in der Monatsschrift „Deutsche Rundschau" (Jahrgang 1889, Maiheft, S. 211, und Juniheft, S. 346) acht Briefe J. R. Mayer's an den Mediciner W. Griesinger und sechs Antworten des Letzteren veröffentlicht, die sämmtlich aus den Jahren 1842 bis 1844 stammen und die für die Beurtheilung der Entwickelung Mayer's von hohem Werthe sind. Aus ihnen geht hervor, dass Mayer's erste Schrift vom Jahre 1842 von ihm selbst nur als eine ganz vorläufige, zur Wahrung der Priorität verfasste, angesehen wurde. (Brief vom 5. und 6. December 1842 an Griesinger: „Die Stelle in Liebig's Chemie, S. 32, von der Du mir schreibst, erschien zuerst in seinen Annalen, ich glaube im Februar- oder März-Heft, und bestimmte mich gerade, einige meiner Hauptsätze in dogmatischer Form vorläufig zu geben, auf die ich das Prioritätsrecht nicht verlieren mochte.") Ferner zeigt sich, dass er vom Anfang an die stoffliche Theorie der Wärme in schroffster Form negirte und die letztere, ebenso wie Schall, Licht und Elektricität, mit der Bewegung als vollkommen in einander umwandelbare Objecte identificirte. Freilich unterlässt er dabei das nähere Eingehen auf das eigentliche Wesen dieser Erscheinungen und begnügt sich damit, die vollkommene, quantitative Aequivalenz derselben überall in der Natur zu verfolgen und nachzuweisen. Mit welcher genialen Klarheit er aber die kolossale Tragweite seiner Entdeckung des mechanischen Aequivalents der Wärme erkannte, das ist fast aus

jeder Stelle der Briefe zu ersehen. Besonders charakteristisch dafür, wie überhaupt für die feste, allen unsicheren Speculationen abgeneigte Natur Mayer's ist die Stelle, mit der er die Darlegungen für seinen Freund Griesinger schliesst: „Wahrlich, ich sage Euch, eine einzige Zahl hat mehr wahren und bleibenden Werth, als eine kostbare Bibliothek von Hypothesen."

S. 361, Anm. 1): Joule ist am 11. October 1889 in Salford gestorben.

S. 382: Auch Mayer beruft sich zum Beweise seiner Ansichten auf die Unmöglichkeit eines perpetuum mobile und zwar in richtigerer Weise, als dies sonst wohl geschehen. Er führt in den obigen Briefen für die Wahrheit seiner Behauptungen an: „1) Die einfache Consequenz aus einfachen, nicht gut zu leugnenden Principien. 2) Ein Beweis, der, für mich subjectiv, die absolute Wahrheit meiner Sätze darthut, ist ein negativer; es ist nämlich ein in der Wissenschaft allgemein angenommener Satz, dass die Construction eines mobile perpetuum eine theoretische Unmöglichkeit sei (d. h. wenn man von allen mechanischen Schwierigkeiten, wie Reibung etc., abstrahirt, so bringt man es doch auch in Gedanken nicht hin); meine Behauptungen können aber alle als reine Consequenzen aus diesem Unmöglichkeitsprincipe betrachtet werden, leugnet man mir einen Satz, so führe ich gleich ein mobile perpetuum auf. 3) Ein dritter Beweis ist von der Wissenschaft aus den Lehren der Experimentalphysik zu führen. Dieses ist eine an sich nicht limitirte Aufgabe, an der ich unverdrossen fortarbeite."

S. 421, Z. 3: Lies Naturkörper statt Naturkräfte.

S. 421, Anm. 2), Z. 4: Lies als Maass des Maximums von Wirkungsgrösse statt als Maass der Wirkungsgrösse.

S. 439, Z. 9: Lies Galbraith statt Gabbraith.

S. 440, Z. 6 und S. 443, Z. 2: Lies Baden Powell statt Baden-Powell.

S. 499, Z. 1 und 4 v. u.: Lies Clerk Maxwell statt Clerk-Maxwell.

S. 504, Z. 16: Lies $u'$ statt $u'_1$.

S. 507, Z. 6: Lies $e'$ statt $e'_1$.

S. 563, Anm. 4), Z. 9 v. u.: Lies Korteweg statt Kortewey.

S. 573, Z. 2 nach der Tabelle: Lies bedeutend **kleiner** statt bedeutend grösser.

S. 576, Z. 4: Lies Balfour Stewart statt Balfour-Stewart.

S. 576, Anm. 3): Lies Kurzes Lehrbuch der Physik von Balfour Stewart etc.

S. 576, Anm. 4): Lies W. K. statt W. R.

S. 580, Z. 18: Lies V. Dvorák statt Č. Dvořák.

S. 580, Anm. 4): Füge ein Pogg. Ann. CLVII, S. 42, 1876; vor Wiedem. Ann. III.

S. 599, Z. 9 v. u.: Lies $\frac{\varrho^2 r^2}{E^2} \cdot \frac{\pi \nu}{3} dt \, [f(\varrho) + f(r)]$

statt $\frac{\varrho^2 r^2}{E^2} \cdot \frac{\pi \nu}{3} [f(\varrho) + f(r)]$.

S. 641, Z. 3: Lies Freiberg statt Freiburg.

S. 655, Anm. 1), Z. 6 v. u.: Lies Hautefeuille statt Hautfeuille.

S. 661, Anm. 2), Z. 1 v. u.: Lies CXXIV, S. 295 statt CXIV, S. 481.

S. 665, Anm. 5): Lies Pogg. Ann. CXLIII, S. 88 u. 290.

S. 718, Z. 10: Lies ist an das Fernrohr statt ist das Fernrohr an.

S. 746, Z. 9: Lies können statt konnten.

S. 797, Z. 18: Lies Tainter statt Taiter.

# Eintheilung der Geschichte der Physik.

---

## IV. Geschichte der Physik in den letzten hundert Jahren von circa 1780 bis circa 1880.

1. Erster Abschnitt von circa 1780 bis circa 1815.
   Periode der Imponderabilien.
2. Zweiter Abschnitt von circa 1815 bis circa 1840.
   Periode der Kraftverwandlungen.
3. Dritter Abschnitt von circa 1840 bis circa 1860.
   Einführung des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft.
4. Vierter Abschnitt von circa 1860 bis circa 1880.
   Anfänge einer kinetischen Physik.



DIE

# GESCHICHTE DER PHYSIK

IN

GRUNDZÜGEN

MIT

SYNCHRONISTISCHEN TABELLEN

DER

MATHEMATIK, DER CHEMIE UND BESCHREIBENDEN NATURWISSENSCHAFTEN

SOWIE

DER ALLGEMEINEN GESCHICHTE.

VON

DR. FERD. ROSENBERGER.

DRITTER THEIL.

GESCHICHTE DER PHYSIK IN DEN LETZTEN HUNDERT JAHREN.

ERSTE ABTHEILUNG.

BRAUNSCHWEIG,

DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN.

1887.

# IV.

# Geschichte der Physik in den letzten hundert Jahren.

## Von circa 1780 bis circa 1880.

---

Das innerste treibende Princip in der Entwickelung der Physik ist zu allen Zeiten die jeweilige Anschauung von dem Wesen der Kraft gewesen. Von dem Anfange der Wissenschaften an bis auf die gegenwärtige Zeit hat die Idee von der Kraftwirkung den Arbeiten der Physiker die letzte Richtung gegeben, wenn auch die Triebkraft dieser Idee bald mehr und bald weniger unverhüllt hervorgetreten ist. Den Alten waren die Naturkräfte natürliche Anlagen der verschiedenen Naturkörper, verschiedenartige, den Stoffen von Natur eingepflanzte Neigungen oder Nöthigungen zu ganz bestimmten Wirkungen oder Bewegungen. Diese naiv-anthropologische Anschauungsweise bildete Aristoteles systematisch aus und mit wie nach ihm hat sie geherrscht bis weit in die Physik der neueren Zeit herein. Zum vollständigen Bruche mit diesen Vorstellungen brachte die Physiker in ihrer Gesammtheit erst Descartes, der für die Materie keine andere Eigenschaften als Ausdehnung und Beharrlichkeit in ihrem Bewegungszustande zuliess, jedes Streben aber, jeden Antrieb zur Bewegung in der Materie ausdrücklich negirte. Für Descartes existirte keine andere Kraft als die Stosskraft, welche bewegten Körpern eigenthümlich ist, und für ihn gab es keine andere natürliche Ursache der Bewegung als wieder die Bewegung selbst.

Indessen vermochte der grosse Mechaniker Newton die Cartesianischen Ableitungen der natürlichen Bewegungen aus elementaren Wirbelbewegungen nicht als richtig anzuerkennen und die Bewegungsgesetze der Himmelskörper schienen ihm solchen Bewegungen, wie sie Descartes seinen Deductionen zu Grunde gelegt hatte, direct zu widersprechen. Er erklärte danach nicht bloss die Cartesianischen Wirbel für unmöglich, sondern liess es überhaupt unentschieden, ob die in den Bewegungen der himmlischen wie der irdischen Körper beobachtete allgemeine Gravitation durch vorhergehende Bewegungen erst verursacht worden oder eine elementare Qualität der Materie sei. Seine Schüler beseitigten diese Unsicherheit, indem sie, unter stillschweigender Billigung des Meisters, die Gravitation ausdrücklich für eine primitive Kraft erklärten und aller Materie die Anziehungskraft als Naturanlage wieder einpflanzten. Diese fundamentale Umänderung trieb zu weiteren Neubildungen. Newton war nur auf mechanischem Gebiete, vor Allem in dem Bereiche der Himmelsmechanik ein directer Gegner von Descartes gewesen; für die übrigen physikalischen Gebiete, wie Elektricität und Magnetismus, behielt er vielfach die Cartesianischen Vorstellungen bei. Als dann mit dem wachsenden Ansehen der Newton'schen Schule auch diese Reste beseitigt werden sollten, zeigten sich neue Schwierigkeiten. Da jede Bewegung in jede andere umgewandelt werden kann, so konnte Descartes wohl aus einer Art von Bewegung alle anderen physikalischen Bewegungen ableiten. Die Newtonianer aber brauchten zur Erklärung der verschiedenen physikalischen Erscheinungen auch ganz verschiedene Zug- und Druckkräfte. Diese verschiedenen Kräfte durften nicht der gewöhnlichen sichtbaren Materie als Ureigenschaften zugeschrieben werden, weil sie an dieser sich veränderlich und sowohl der Stärke als auch der Art nach wechselnd zeigten. Danach blieb nur übrig, für alle die verschiedenen Attractions- und Repulsionskräfte auch verschiedene Materien zu construiren, deren jeder eine bestimmte Kraft als Urqualität eigenthümlich war, und die sich unter einander vereinigen oder von einander trennen, gegenseitig binden oder auch gegenseitig lösen konnten. So erhielt man, neben der sichtbaren, tastbaren, gestalteten Materie,

noch andere Urstoffe, wie die elektrischen, die magnetischen Flüssigkeiten, den Licht- und den Wärmestoff, die diese Eigenschaften in geringem Maasse oder gar nicht besassen. Das Verhältniss aller dieser Materien zu einander blieb dabei immer ein unklares, nur ihre Beziehungen zur allgemeinen Gravitation wurden genauer festgestellt. Als in den letzten Jahrzehnten des vorigen Jahrhunderts der Chemiker die Wage immer mehr als seinen Fundamentalapparat erkannte, kam auch der Physiker zur Ueberzeugung, dass jene hypothetischen Materien unter keiner Bedingung schwer sein könnten. Damit theilten sich von selbst die Materien in zwei grosse Gruppen. Die erste derselben umfasste die tastbare, gewöhnliche Materie, der als Urqualität nur die Gravitation zukam. Die zweite Gruppe enthielt die Imponderabilien, denen die Kraft zu leuchten oder die Kraft zu wärmen oder magnetische oder elektrische Kräfte eigenthümlich waren. Mit der Ausbildung dieses Systems kam man vor dem Schlusse des vorigen Jahrhunderts zu Ende. Die reelle Existenz der Imponderabilien stand dann bis ins zweite Jahrzehnt des neuen Jahrhunderts so fest, dass die Physiker mit wenigen Ausnahmen von der Materialität der Wärme und des Lichts gerade so fest überzeugt waren, wie von der Existenz der ponderabelen Materie selbst. Wir können darum die erste Periode des gegenwärtigen Zeitalters der Physik zutreffend als die Periode der Imponderabilien bezeichnen.

Die Weltanschauung dieses Zeitraumes war stetig und ohne Dazwischentreten einer epochemachenden Autorität aus der Newton'schen Physik gefolgt; es war nur natürlich, dass man dieselbe dem Meister Newton vollständig zueignete und diesen noch immer als Begründer der einzig richtigen und einzig möglichen Physik feierte. Während man einer physikalischen Ansicht nur eine Hinneigung zur Cartesianischen Methode nachzusagen brauchte, um dieselbe bei den damaligen Physikern ganz in Misscredit zu bringen, stimmten die letzteren noch vollinhaltlich mit den begeisterten Worten überein, die Musschenbroeck im Jahre 1731 seiner Uebersetzung der Saggi di naturali esperienze vorausschickte: „Weil nun mehr als 60 Jahre seit der ersten Ausgabe dieses Werkes verflossen, so ist die Philosophie inzwischen mit nicht gerin-

gem Wachsthum vorgeschritten, besonders seitdem der allerreichste und höchste Lenker und Vorsteher aller menschlichen Dinge, mit unendlicher Liebe und unbegreiflicher Wohlthätigkeit die Sterblichen seiner Zeit bedenkend, ihre Gemüther nicht länger in dem Druck der alten Finsterniss lassen wollte, sondern ihnen als ein vom Himmel gesandtes Geschenk jenes britische Orakel, Isaac Newton, gewährt, welcher eine erhabene Mathesin auf die zartesten Versuche anwendend, und alles geometrisch beweisend, gelehrt hat, wie man in die verborgensten Geheimnisse der Natur dringen und eine wahre befestigte Wissenschaft erlangen könne. Deswegen hat auch dieser mit göttlichem Scharfsinn begabte Philosoph mehr geleistet, als alle die erfindsamsten Männer von den ersten Anfängen der Weltweisheit zusammen. Verbannt sind nun alle Hypothesen; die Weltweisheit wird durch die gründlichste Lehre erweitert und auf den menschlichen Nutzen übertragen, durch mehrere angesehene, die wahre Methode befolgende, gelehrte Männer."

Angriffe sehr bedeutender Physiker gegen einzelne Punkte des herrschenden Systems begannen allerdings schon in dieser Periode recht bedeutende Schwierigkeiten der sogenannten Newton'schen Physik aufzudecken, berührten aber noch die Allgemeinheit kaum. Rumford's, Davy's, Young's fest ausgesprochene Ueberzeugung von der Unmöglichkeit einer materiellen Theorie der Wärme, ihre beweisenden Versuche wurden nicht widerlegt, aber desto schneller vergessen. Young's Angriffe auf die Emanationstheorie des Lichts konnten einzelner fundamentaler Schwächen wegen nicht durchdringen. Kant's metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaften, die sich nur mit der Constitution der Materie überhaupt beschäftigten, schienen der herrschenden Anschauung eher freundlich als feindlich; der Beweis, dass nur eine Materie, ein alles durchdringender, unsperrbarer Aether imponderabel sein könne, blieb in Kant's nachgelassenen Schriften verborgen bis auf den heutigen Tag.

Erst Fresnel riss mit seinem Umsturz der herrschenden Lichttheorie auch eine Lücke in das feste Gefüge des sogenannten Newton'schen Systems und verringerte damit die Festigkeit des Ganzen. Fresnel begann seine optischen Arbeiten mit einem

Tadel des bis dahin für unfehlbar gehaltenen Beherrschers der Physik. So sehr auch Newton's Verdienste auf dem Gebiete der Gravitationstheorie anzuerkennen seien, so wenig dürfe man ihn überall als unfehlbar annehmen. Seine Emanationstheorie des Lichts widerspreche entschieden den Thatsachen, und Fresnel steht nicht an zu behaupten, dass Newton's Optik Fehler in sich schliesse, die sich mit leichter Mühe hätten vermeiden lassen. Durch seine Undulationstheorie schritt Fresnel methodisch und principiell über Newton und seine physikalischen Fundamente hinaus. Zum ersten Mal wieder seit Descartes erklärte er eine Fülle physikalischer Erscheinungen, nicht Newtonianisch durch besondere elementare Eigenschaften einer Materie, sondern Cartesianisch durch eigenthümliche Bewegungen derselben. Da indessen diese Erklärungen auf eine Klasse von Erscheinungen beschränkt blieben, so erkannten die Zeitgenossen Fresnel's die principielle Bedeutung dieses Schrittes noch nicht ganz und glaubten die Imponderabilien nur ausser ihren Eigenschaften noch mit gewissen Bewegungen begaben zu müssen, um diese Imponderabilien selbst zu retten. Dass eine solche Rettung unmöglich, dass die Aufgabe der Imponderabilien unvermeidlich, zeigte sich erst allmählich, als immer klarer und deutlicher aus allen physikalischen Erfahrungen ein neues Princip hervorleuchtete, die Idee von der Verwandlung der Kraft. Das Moment, welches hauptsächlich zu dieser Idee drängte, war die erstaunlich schnelle Entwickelung unserer Kenntnisse von der Elektricität. Gleich im Anfang unseres Jahrhunderts hatten die chemischen Wirkungen der Elektricität zur Behauptung einer vollständigen Identität der elektrischen und chemischen Kräfte geführt. Da aber die chemischen Verwandtschaften für die Physiker immer in ihren Verhältnissen zu den Imponderabilien unklar gewesen, so berührte das die übrige Physik nicht weiter. Die Lichterscheinungen der elektrischen Entladung hatte man zuerst durch eine Zusammengesetztheit der elektrischen Flüssigkeiten mit Lichtstoff zu erklären versucht, zuletzt aber diese Ansicht stillschweigend aufgegeben. Die bis ins Unbegrenzte fortdauernde Wärmeentwickelung des galvanischen Stromes war für die damalige Physik ein unlösbares Räthsel, das man aber noch so viel als möglich

ignorirte. Alle diese Erscheinungen erhielten erst ein anderes Ansehen, als mit dem Jahre 1820 die elektrischen Ströme auch magnetische Kräfte zeigten, als man durch Elektricität stärkere magnetische Wirkungen hervorbringen lernte als durch Magnete selbst. Ampère eliminirte direct nach der Entdeckung des Elektromagnetismus aus der Reihe der Imponderabilien wenigstens die magnetischen Flüssigkeiten, und obgleich vielen Physikern diese That als eine Hinneigung zum Cartesianismus verdächtig erschien, so blieb ihnen doch die Anerkennung derselben nicht erspart. Damit aber war auch den übrigen Imponderabilien das Todesurtheil gesprochen.

Wenn sich zeigte, dass alle Naturkräfte jederzeit und in jeder Menge in einander umwandelbar waren, so konnten dieselben im letzten Grunde nicht an unwandelbare, elementare Materien gebunden sein und die Imponderabilien mussten ihren Charakter gänzlich umändern oder gänzlich verschwinden. Doch geschah das letztere nur sehr allmählich und in Wirklichkeit beendet ist der Process auch heute noch nicht. Die Imponderabilien mit ihren elementaren Kräften waren ein sehr bequemes Mittel zur Erklärung der Naturerscheinungen; sie für unmöglich zu erklären war leichter, als genügenden Ersatz für sie zu finden. Darum liess man dieselben nur so weit ausdrücklich fallen, als man musste und behielt sie unter allgemeiner stillschweigender Duldung so weit bei, als man konnte. Die allgemeine Aufmerksamkeit und die Hauptthätigkeit der Physiker aber wandte sich nun der neuen Idee, dem Nachweis der Möglichkeit und Wirklichkeit einer allseitigen und wechselseitigen Transformation der Naturkräfte im Allgemeinen, wie im Einzelnen und Speciellen zu. Die Elektricität zeigte sich dabei noch immer als die beste Vermittlerin, und mit ihrer Hülfe hatte man schon bis zum Anfange der vierziger Jahre die unbegrenzte Umwandlungsfähigkeit aller Naturkräfte im Grossen und Ganzen nachgewiesen. Wir müssen darum an dieser Stelle einen zweiten Zeitraum der modernen Physik als abgeschlossen ansehen, den wir am besten als die Periode der Kräftetransformationen bezeichnen.

Damit aber trat wieder eine neue Aufgabe an die Physiker

heran. Waren wirklich alle Naturkräfte vor- und rückwärts in einander umwandelbar und sollte sich daraus, was unbedingt zu erwarten war, auf die Einheit aller Naturkräfte schliessen lassen, so musste mit mathematischer Sicherheit festgestellt werden, dass in allen diesen Umwandlungen auch die Quantität dieser Kräfte immer dieselbe blieb, dass niemals ein Theil der Kraft in irgend einer Transformation verloren gehen oder auch erzeugt oder gewonnen werden könnte. Die Idee von der Verwandlung der Kraft drängte von selbst zum Gesetz von der Erhaltung der Kraft. Der Ausbildung, der Verification, der allseitigen Anwendung dieses Gesetzes waren die nächsten zwanzig Jahre gewidmet und mit noch ausschliesslicherem Rechte als sonst können wir diesen Zeitraum der gegenwärtigen Physik als den des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft charakterisiren.

Nachdem man das Gesetz von der Erhaltung der Kraft auf allen Gebieten der Physik zur Anerkennung gebracht und seine Uebereinstimmung mit der Erfahrung überall nachgewiesen, machte sich auch das Bedürfniss einer mehr theoretischen Verwerthung desselben geltend. Je mehr man geneigt war, das Gesetz als corrigirendes Princip für alle physikalischen Theorien zu gebrauchen, desto mehr wurde man getrieben, das Verhältniss dieses Gesetzes zu den herrschenden fundamentalen Anschauungen von Materie und Kraft genauer zu untersuchen und diese Anschauungen jenem Gesetze entsprechend zu gestalten. Schon die Begründer des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft waren sich ganz klar darüber, dass die Begriffe von den lebendigen Kräften bewegter Körper und von den Kräften als elementare Eigenschaften bestimmter Materien absolut nicht in der bisherigen Weise neben einander bestehen könnten. Die lebendige Kraft eines bewegten Körpers ist eine bestimmte, endliche Quantität, die sich mit dem Bewegungszustand vermehrt oder vermindert und bis zu Null aufgezehrt werden kann. Die Kraft als elementare Eigenschaft der Materie ist quantitativ unbegrenzt und keiner Grössenveränderung fähig. Das Gesetz von der Erhaltung der Kraft kann mit diesen elementaren Eigenschaften direkt nichts zu thun haben und bezieht sich nothwendiger Weise

nur auf die begrenzten Wirkungen, welche jene Eigenschaften je nach der Vertheilung der Materien im Raume hervorbringen können. Danach fand man für gut, den Namen Kraft jenen elementaren Eigenschaften allein zu überlassen und für diese begrenzten, quantitativ bestimmten Wirkungsfähigkeiten einen neuen (wenn man will auch einen recht alten) Namen anzunehmen, den Namen der Energie.

Diese Neuerung hatte weitere Folgen, als blosse Namensänderungen sonst wohl mit sich bringen. Auf der einen Seite führte sie dazu, jene elementaren Eigenschaften und die Materien, welchen man sie angehängt hatte, bei physikalischen Betrachtungen mehr und mehr ausser Spiel zu lassen. Auf der anderen Seite munterte sie auf (da man doch schliesslich alle Energie nur durch die Bewegung, welche sie hervorbringt oder hervorzubringen im Stande ist, messen und beurtheilen kann), jene elementaren Eigenschaften überhaupt zu negiren und alle Wirkungen aus ursprünglichen, wohl wandelbaren aber doch nie zerstörbaren Bewegungen einer Materie zu erklären. Dieser Process, der sich bei genauer Betrachtung als eine Rückkehr, zwar nicht speciell zu den Cartesianischen Elementen und ihren Wirbeln, wohl aber zu der Cartesianischen Anschauung von der Kraft erweist, bildet heute den Werdeprocess der modernsten Physik. Er ist in seiner Richtung dem Entwickelungsprocess der Physik im vorigen Jahrhundert entschieden entgegengesetzt. Wo dieses in einzelne Disciplinen auflöste, verschiedene, von einander unabhängige Materien und Kräfte constatirte, da vereinigt die moderne Physik das vorher getrennte und kommt immer mehr zu einer einheitlichen Anschauung der Materien wie der Kräfte. Die Tendenz zur Sammlung des Vereinzelten, zur Vereinigung aller physikalischen Disciplinen zu einer einheitlichen Wissenschaft ist das hervorragendste Kennzeichen der gegenwärtigen Physik. Selbst die Schwesterwissenschaften der Physik, Chemie und Astronomie, nähern sich unter dem Einfluss der neuen Ideen mehr als früher dem gemeinsamen Stamme. Die Chemie giebt die Unwandelbarkeit ihrer vielen Elementarstoffe wenigstens im Princip auf und erkennt die Ableitung derselben aus wenigen oder einer

Urmaterie als Problem an. Die Astronomie aber wird aus einer Astromechanik, auf welche sie seit Newton mehr und mehr reducirt war, nach der Entdeckung der Spectralanalyse mehr als je vorher zu einer vollständigen Astrophysik.

Was nun die Wirksamkeit der methodischen Factoren, der Philosophie, der Mathematik und des Experiments in der neueren Physik betrifft, so entwickelte sich dieselbe ganz in der Art, wie sie in dem vorigen Zeitraume angedeutet war. In immer breiterem Strome floss die Experimentalphysik dahin und geraume Zeit schien es, als würde sie sich eine Alleinherrschaft auf dem ganzen Gebiete erringen. Die kolossalen Erfolge, welche dieselbe auf dem Gebiete der Elektricitätslehre davon trug, liessen auch wirklich zu manchen Zeiten und auf manchen Seiten die Nothwendigkeit anderer methodischer Factoren auf physikalischem Gebiete ganz übersehen. Zwar wurde am Ende des vorigen Jahrhunderts die Naturphilosophie in Kant wieder mächtig und fand durch Kant's Autorität auch bedeutende Anhänger unter den Physikern. Bald darauf aber kam durch das schlecht fundamentirte Vorgehen einzelner Nachfolger und Pseudonachfolger Kant's, die auf die Sicherheit der kritischen Philosophie hin Luftschlösser für naturwissenschaftliche Gebäude ausgaben, die Naturphilosophie in stärkeren Misscredit als je zuvor. Die Worte bitteren Spottes, welche der berühmte Chemiker Berzelius im Jahre 1827 den Philosophen zurief: „die Naturphilosophen unserer Zeit würden immer am vorsichtigsten handeln, sich bei solchen Gegenständen zu halten, welche die Naturforscher nicht controlliren können", kennzeichnen deutlich die allgemeine Schätzung der Naturphilosophie. Die Philosophen haben sich danach von der Naturphilosophie als einem zugleich schwierigen und undankbaren Gebiete mehr und mehr abgewandt, und längere Zeit hindurch ist dasselbe nur von Physikern und Chemikern im atomistischen Sinne bearbeitet worden. Doch führte das letztere nicht zu einer Annäherung an die Philosophen, da die letzteren meist an der Kant'schen Annahme einer continuirlichen Raumerfüllung durch die Materie festhielten. Erst in der neuesten Zeit, nachdem Kant's Ansehen auch unter den Physikern wieder gestiegen, hat man sich bemüht, die Gegensätze auszugleichen oder wenigstens die Möglichkeit einer solchen Ausgleichung nachzuweisen.

Wollen wir das Verhältniss der Mathematik zur Physik richtig beurtheilen, so müssen wir genau unterscheiden zwischen dem Mathematiker, der nur das Quantitative der Erscheinungen mathematisch bestimmen und demjenigen, welcher die Erscheinungen selbst mathematisch deductiv aus einfachen, fundamentalen Voraussetzungen ableiten will. Die erstere Arbeit hat auch der Experimentalphysiker immerwährend zu seinen Aufgaben gezählt und musste das um so mehr, als auch bei der blossen Beschreibung der Naturerscheinungen die Angabe der quantitativen Verhältnisse höchsten Werth hat. Doch ist zu verschiedenen Zeiten das Interesse für die Messkunst auch bei dem Experimentalphysiker in verschiedener Stärke thätig gewesen. So lange z. B. die elektrischen Erscheinungen noch neu waren, so lange man noch immer neue Arten der Wirkungen an ihnen entdeckte, begnügte man sich gern mit der rein qualitativen Beobachtung. Erst als diese bis zu einer gewissen Grenze vorgeschritten, fühlte man mehr und mehr das Bedürfniss einer quantitativen Bestimmung auch der elektrischen Erscheinungen. Das Gesetz von der Erhaltung der Kraft aber wurde von der Mitte dieses Jahrhunderts an die mächtigste Triebfeder für eine allseitige Ausbildung der mathematischen, messenden Physik.

Die mathematische Deduction schliesst der Experimentalphysiker gern von seinem Gebiete aus und betrachtet sie oft mit eben so viel Misstrauen und Missvergnügen als die verpönte Naturphilosophie. Trotzdem steht die mathematische Deduction mit der physikalischen Messkunst in einem engen, niemals zu lösenden Wechselverhältniss. Einestheils bedarf die physikalische Messkunst zur Bildung passender Einheitensysteme, wie auch zur Isolirung der zu messenden physikalischen Wirkungen gewisser theoretisch-mathematischer Grundlagen und wird erst dadurch zur Erfüllung ihrer Aufgaben fähig, wie sich das deutlich an der Entwickelung der Elektricitätslehre nach der Aufstellung des Ohm'schen Gesetzes und der Entwickelung der elektrischen Maasssysteme zeigte. Andererseits aber bedingt auch die Anwendung der mathematischen Deduction das Vorhandensein gewisser quantitativ genau bestimmter Beobachtungen, durch welche erst die Ergebnisse der Deduction ihre Verification erhalten können. Davon zeugen deut-

lich die beiden vollendetsten und überzeugendsten Thaten der mathematischen Deduction, die Theorie der Gravitation aus dem vorigen Zeitalter der Physik, wie die Entwickelung der Undulationstheorie in dem jetzigen.

Diese beiden Theorien dürfen wir auch getrost als vollgültige Zeugnisse gegen die Empiriker anführen, die nach dem Vorgange Bacon's nur eine einzige naturwissenschaftliche Methode, die Induction anerkennen wollen. Tyndall wendet sich gegen solche Physiker, die heute wieder in England Schule zu machen versuchen, mit den beherzigenswerthen Worten, die eine allgemeine Bedeutung haben: „Man hat Faraday einen ausschliesslich inductiven Forscher genannt. Ich fürchte, wenn Sie mir erlauben wollen dies zu sagen, dass in unserm guten England eine grosse Menge von Unsinn geschwatzt wird über inductives und deductives Verfahren. Viele erklären sich für Induction, Andere für Deduction, während der Beruf eines Forschers, wie Faraday, in Wahrheit in einer steten Vereinigung beider Methoden besteht.“ Die Induction wird in allen Gebieten der Physik wenigstens eine Stelle finden, wo sie Hypothesen über das Wesen der Erscheinung bilden muss, die sich nicht direct durch Beobachtung verificiren lassen. Ueberall wo man von der Vielfältigkeit der Erscheinungen auf die zu Grunde liegenden, das Mannigfaltige verbindenden Ursachen kommen will, wird man dies nur durch Hypothesen können, deren Sicherheit am besten, vielleicht auch einzig und allein, durch die Ergebnisse erhellt, die aus den Hypothesen durch richtige mathematische Deductionen gewonnen sind. Diese Erkenntnissmethode, die, von Hypothesen ausgehend, die Ergebnisse ihrer Deduction experimentell verificirt, können wir als die hypothetisch-deductive bezeichnen, zum Unterschied von jener, welche von Axiomen aus deducirend, keine Verification ihrer Resultate bedarf. Diese letztere Erkenntnissmethode, welche die reine Mathematik und meist auch die Philosophie für sich in Anspruch nimmt, kann dann die axiomatisch-deductive heissen. Die hypothetisch-deductive Methode ist das Ideal der Physik; in ihr vereinigen sich die drei speciellen Methoden derselben, die experimentelle, die mathematische und die

philosophische. Das Experiment liefert die Grundlagen der Hypothese. Die Bildung dieser, die doch nicht so frei ist, als man manchmal denkt, hängt von erkenntnisstheoretischen Bedingungen, von philosophischen Grundanschauungen über Kraft und Materie ab. Die Deduction der Erscheinungen aus der Hypothese ist vor Allem Sache der Mathematik. Bei der Verification aber kommt abermals die Erfahrung zu ihrem Recht. Die Erfahrung bleibt das $\alpha$ und $\omega$ aller Naturerkenntniss. Wurde dieser Satz zu Anfang unseres Zeitalters der Physik von manchen Naturphilosophen unbeachtet gelassen, so übersahen in der Mitte unseres Jahrhunderts auch manche Experimentalphysiker, dass ein reines Constatiren von Thatsachen noch keine Wissenschaft ist und dass an der wissenschaftlichen Verarbeitung des erlangten Materials die Mathematik und die Speculation ihr nothwendiges Theil haben müssen. Jedenfalls ist in neuerer Zeit das letztere mit der immer fortschreitenden Häufung des empirischen Materials immer klarer geworden. Die Versuche zur Ausbildung einer mechanischen Wärmetheorie, einer fundamentalen Theorie der Elektricität und des Magnetismus, die Bemühungen um eine sichere Anschauung von Kraft und Materie lassen deutlich das Bestreben erkennen, nun wieder alle methodischen Factoren zu einem wissenschaftlichen Fortschritt der Physik zu vereinigen. Dass diese Bemühungen noch nicht ganz zum Ziele geführt, liegt zuerst wohl an der Grösse und der Schwierigkeit der Aufgabe, vielleicht aber auch an zwei anderen Umständen: vielleicht daran, dass weite Kreise der Mathematiker von der Physik sich abgewandt haben und ausschliesslich neue Gebiete der reinen Mathematik cultiviren, die eines directen Zusammenhanges mit der Natur noch entbehren; vielleicht auch daran, dass unsere Generation ihre speculativen Anlagen durch längere Arbeit erst wieder entwickeln und ihre Fähigkeit zur Theorienbildung mehr und mehr kräftigen muss. Jedenfalls zeugt der noch immer unerfüllte Ruf nach einer Molecularphysik, der noch immer fortdauernde Gebrauch der elektrischen Flüssigkeiten, an deren Realität wohl kein Physiker mehr glaubt, dafür, dass wir nicht am Ende einer physikalischen Periode, sondern mitten in einer solchen stehen, deren Dauer noch nicht abzusehen ist.

1.

## Erster Abschnitt der Physik der letzten hundert Jahre.

Von circa 1780 bis circa 1815.

---

### Periode der Imponderabilien.

Zwei bedeutende naturphilosophische Systeme stehen am Eingange unseres letzten Zeitalters der Physik; das mechanische des Lesage und das dynamische von Kant. Newton's berühmter, wenn auch nicht ganz wahrer Ausspruch „Hypothesen bilde ich nicht" hatte fast hundert Jahre lang seine Jünger von allen naturphilosophischen Speculationen ferngehalten. Schliesslich fanden sich doch für diese Newton'sche Physik schwer überwindliche Schwierigkeiten, selbst auf ihrer eigenen Domaine, der Mechanik der Himmelsbewegungen. Schon Newton hatte die Gravitation nicht der Materie als homogenes Ganzes, sondern vielmehr den einzelnen Theilchen derselben, den Atomen beigelegt, über deren Wesenheiten er sich allerdings, als zu hypothetisch, nicht weiter ausliess. Je genauer man aber die Bewegungen der Himmelskörper studirte, desto mehr merkte man, dass die Anordnung der Theile oder die Form derselben von grossem Einfluss auf die Wirkung sei und wurde immer mehr gezwungen, auf innere Gestaltung des Stoffes, auf seine Homogenität, Dichtigkeits- und Massenvertheilung Rücksicht zu nehmen und diese zu untersuchen. Auf ähnliche Wege drängten dann auch die anderen Zweige der Physik, die Wärmelehre, die Akustik u. s. w. Damit schien die Zeit gekommen, das Versäumte nachzuholen, und in weitesten Kreisen interessirte man

sich wieder für die uralten Probleme von der Materie und ihren Kräften. Als Jacobi im Jahre 1801 bei einer allgemeinen Audienz Napoleon vorgestellt wurde, that dieser nur die eine Frage: Qu'est ce que la matière? und wandte dem wortlosen, verblüfften Philosophen ohne Weiteres den Rücken.

Aehnlich aber, wie hier dem einzelnen Philosophen, erging es der Naturphilosophie überhaupt. Den immer sich mehrenden experimentellen Entdeckungen auf dem Gebiete der Wärme, der Elektricität etc. schien keines der auftauchenden naturphilosophischen Systeme genügen zu können. Die Lehre von den Imponderabilien, die Ideen von besonderen Wärme- und Lichtstoffen, von elementaren elektrischen und magnetischen Flüssigkeiten wollten weder in das Kant'sche noch in das System von Lesage passen. Ueber die Verhältnisse der verschiedenen Materien unter einander, über die man gern klar geworden wäre, gab überhaupt keine Naturphilosophie Auskunft. So wendeten sich noch lange vor Ende dieser Periode die Physiker von solchen Speculationen als nutzlos ab, um schliesslich dieselben, die doch vielfach ihre Kreise störten und um so prätentiöser auftraten, je weiter sie von der Erfahrung sich entfernten, mit einem ganz kräftigen Hasse zu verfolgen.

Für den speciellen Physiker war noch am Anfange der Periode das fruchtbarste physikalische Gebiet die Wärmelehre. Der Wärmestoff erwies sich damals als das kräftigste und allseitig wirksamste Agens. Der Chemiker fand ihn bei allen chemischen Veränderungen wirksam. Der Meteorologe erkannte seine Wirksamkeit in allen atmosphärischen Erscheinungen. Die schnelle Entwickelung der Dampfmaschinen zeigte ihn als den constantesten, bequemsten und leistungsfähigsten Kraftlieferanten. Selbst die Constitution der Körper, die Aggregatzustände der Materie wurden als gänzlich abhängig von ihm erkannt. Leider scheiterten alle Versuche seine Wesenheit, seine Verwandtschaften zu anderen Stoffen näher zu bestimmen, und die neuesten Versuche über die Reibungswärme wollten sich überhaupt keiner materiellen Theorie der Wärme fügen. Desto besser gelangen die Bestimmungen und die Messungen der Wirkungen des Wärmestoffs. Die Gesetze der Wärmestrahlung wurden mit Hülfe von Differentialthermometern von mehre-

ren Beobachtern in guter Uebereinstimmung abgeleitet. Die Ausdehnung der Luftarten durch die Wärme bestimmten Dalton und Gay-Lussac so genau, dass sie die Gleichheit dieser Ausdehnung für alle Gase aussprechen konnten. Die Messung der Ausdehnung der Flüssigkeiten führte zur Erkenntniss der anomalen Ausdehnung des Wassers. Merkwürdiger Weise wurden die Messungen der Ausdehnung fester Körper, welche Lavoisier und Laplace unternahmen, erst nach längerer Zeit bekannt und berühmt. Die Entwickelung der Dampfmaschinen veranlasste zuerst in England Versuche zur Bestimmung der Elasticität der Dämpfe, vor Allem des Wasserdampfes. Dalton kam durch solche Versuche zu seinem berühmten, im Anfange viel bekämpften Gesetze von der unabhängigen Verbreitung verschiedener Dämpfe in demselben Raume, und konnte danach den lange schwebenden, heftigen Streit über Verdampfung und Verdunstung endgültig entscheiden. Ueber das Leitungsvermögen der Körper für Wärme, wie über das Abkühlungsgesetz dagegen konnte man noch zu keiner Klarheit kommen, weil man die mehrfachen dabei in Betracht kommenden Wärmebewegungen nicht von einander zu trennen verstand; nur die merkwürdig geringe Leitungsfähigkeit der Flüssigkeiten wurde durch Rumford sicher constatirt. Alle diese Untersuchungen ermöglichten ein besseres Verständniss der atmosphärischen Erscheinungen und förderten dadurch das Interesse für Meteorologie. Das Wachsen des letzteren zeigte sich deutlich in den lebhaften Bemühungen um die Construction von meteorologischen Instrumenten, wie Hygroskopen, Maximal- und Minimalthermometern u. s. w.

Der Physik der tastbaren Materie wurde ein neuer Zweig, die Akustik, definitiv eingefügt. Merkwürdiger Weise war hier die mathematische Seitenlinie eher entstanden, als die experimentelle. Durch das günstige Zusammentreffen einer sich reich entwickelnden Kunst des musikalischen Instrumentenbaues mit dem Genie grosser Mathematiker war schon im vorigen Zeitalter die mathematische Theorie der Saiten, der Pfeifen u. s. w. fleissig bearbeitet und vielfach gefördert worden. Eine experimentelle Akustik entstand erst durch Chladni. Seine Arbeiten bewiesen dann nicht bloss die Fruchtbarkeit der experi-

mentellen Methode auf diesem Gebiete, sondern auch die Nothwendigkeit derselben für die Verification der mathematischen Deductionen und das Ungenügen mehr gelegentlicher praktischer Beobachtungen für diesen Zweck. Endlich, und das erregte eine Zeit lang den grössten Enthusiasmus, liess Chladni's Entdeckung der Klangfiguren eine weitere Einsicht in den molekularen Zustand der Materie hoffen. Leider zeigte sich, dass auch dieser Weg zur Erkenntniss des inneren Baues der festen Körper mindestens ein weiter und durchaus kein leichter sei.

In der Mechanik traten während des fraglichen Zeitraumes keine eigentlich neuen Gesichtspunkte hervor. Die Untersuchung der Bewegung unveränderlicher Punktsysteme, starrer Körper, die schon im vorigen Zeitalter so erfolgreich begonnen, wurde in diesem vollendet. Die Arbeiten der grossen Astromechaniker, an erster Stelle Laplace mit seinem berühmten Werke Traité de mécanique céleste (Paris 1799 bis 1825) brachten diesen Abschnitt zu einer verhältnissmässigen Vollendung. Das Gebiet der theoretischen Mechanik überhaupt erhielt durch Lagrange einen allerdings mehr formellen als materiellen Abschluss. Nur da wo die Bewegungen noch in den Wirkungssphären der Molekularkräfte vor sich gingen, blieben die Schwierigkeiten meist mathematisch wie physikalisch unüberwindlich, und selbst der geniale Laplace konnte auf diesem Gebiete, wie seine Theorie der Capillarität zeigt, nicht zu vollkommener Klarheit gelangen. Neben den mathematisch-mechanischen Arbeiten sind einige bedeutende experimentelle Versuchsreihen zu erwähnen. Die von Newton schon angeregte Frage nach dem Fall der Körper auf der bewegten Erde, erhielt jetzt ihre Antwort. Merkwürdiger Weise zeigte sich dabei ausser der schon von Newton geforderten östlichen Abweichung auch eine südliche, die trotz aller Bemühungen der bedeutendsten Mathematiker, Physiker und Astronomen damals weder sicher constatirt, noch weniger aber erklärt werden konnte. Die Arbeiten zur Herstellung eines rationellen Maasssystemes und sicherer Maasseinheiten, die verschiedenen Bestimmungen des specifischen Gewichts und damit der Dichte der Erde sind rühmliche Zeugnisse für die fortschreitende Vervollkommnung der Methoden physikalischer Messungen. In der Construction sinnreicher Apparate, wie des

hydraulischen Widders, der hydraulischen Presse u. s. w. zeigte sich bedeutendes mechanisches Geschick.

Seltsame Schicksale hatte die Optik. Young's Angriffe auf die Emanationstheorie des Lichts, seine Empfehlung der Undulationstheorie, die sich auf die Entdeckung der Interferenz des Lichts stützte, konnten nicht zum Ziele führen, weil die empfohlene Wellentheorie sich neuen Entdeckungen, den glanzvollsten, reizendsten, aber auch verwickeltsten Erscheinungen der ganzen Optik nicht gewachsen zeigte. Die Polarisation des Lichts durch Spiegelung und durch Brechung, die merkwürdigen Erscheinungen der Doppelbrechung des Lichts in durchsichtigen Körpern, die Abhängigkeit dieser Erscheinungen von der Krystallgestalt, die farbigen Linien und schwarzen Kreuze, welche dünne durchsichtige Platten in polarisirtem Lichte zeigten, die Drehung der Polarisationsebene durch verschiedene Stoffe, waren für die Undulationstheorie eben so viele Räthsel, wie Entdeckungen. Dagegen vermochte der geniale Biot alle diese Erscheinungen dem alten ehrwürdigen Gebäude der Emanationstheorie noch ein- oder richtiger anzufügen und dieser Theorie damit zu neuem Glanze zu verhelfen. Freilich waren die Anbaue, welche Biot für seine Zwecke nöthig hatte, die vielen Hülfshypothesen, welche der Emanationstheorie nach und nach zugeeignet wurden, ein ziemlich sicheres Zeichen für die Inconformität der Theorie mit dem Wesen der Sache; aber noch imponirte das Gebäude als Ganzes, und über einzelnen Schönheiten der Theile übersah man die fehlende Einheit, die mangelnde Uebereinstimmung im Allgemeinen.

So verlief die Entwickelung dieser physikalischen Disciplinen noch ganz in dem Rahmen der Physik des vorigen Zeitalters, und man darf ruhig gestehen, dass in den erwähnten Arbeiten noch nicht die Elemente lagen, welche nothwendiger Weise aus jenem Rahmen herausgetrieben hätten. Selbst die Entdeckung des Galvanismus zeigte in ihrem ersten Auftreten kein Moment, das nicht in den Vorstellungskreis der herrschenden Physik passend sich eingefügt hätte. Galvani meinte bei seinen Arbeiten nichts weiter zu bemerken als die allgemeine Verbreitung der thierischen Elektricität, die man in grösster Stärke schon vorher an verschiedenen Arten von Fischen beobachtet hatte. Volta's Contact-

theorie widersprach in ihrer ersten Gestaltung sogar allen weitergehenden Ideen, die zu einer Verallgemeinerung des mechanischen Princips von der Erhaltung der Kraft drängten. Was in der Entdeckung der chemischen und thermischen Wirkungen der galvanischen Elektricität Vorwärtstreibendes lag, das wurde aufgehoben durch gewisse äussere Umstände, die retardirend auf die Entwickelung der Wissenschaft einwirkten. Seit Newton hatte die mathematische Physik ein gewisses Uebergewicht in unserer Wissenschaft behauptet. In den Händen der mathematischen Physiker vorzüglich lag die Gestaltung der physikalischen Grundprincipien, und die grossen Physico-Mathematiker der vorigen, wie dieser Periode, Laplace, Lagrange u. A. behaupteten leicht diese Stellung ihrer Richtung. Sie aber hatten von der letzteren aus wenig Ursache zu principiellen Revolutionen, oder waren auch in ihrem Alter zu solchen wenig geneigt. Die Experimentalphysiker auf der anderen Seite fanden gerade in der imponirend schnellen Entwickelung thatsächlicher Erkenntniss der elektrischen, wie auch der optischen Erscheinungen volle Beschäftigung und volles Genüge. Schliesslich übten auch die revolutionären Umwälzungen, die kriegerischen Ereignisse, welche damals ganz Europa in Mitleidenschaft zogen, trotz aller rühmlichen Anstrengungen der Gelehrten, einen hemmenden Einfluss auf die wissenschaftlichen Arbeiten überhaupt aus.

Die führende Nation im Fortschritt unserer Wissenschaft während der ganzen Periode waren entschieden die Franzosen. Die Engländer versuchten mehrmals kühn reformirend vorzudringen, vermochten aber in den meisten Fällen die Newton'schen Traditionen ihrer Landsleute nicht zu durchbrechen. Die Italiener bemühten sich mit Erfolg, ihre historischen Ansprüche auf eine erste Stelle in dem Reiche der Naturwissenschaften wieder geltend zu machen. Die Deutschen, von den Naturphilosophen abgesehen, nützten mehr als Prüfer, als Richter, als systematische Ordner fremder Errungenschaften, als Verbreiter und Vermittler der Wissenschaften, denn als zielsetzende Führer derselben. Das zeigte sich sowohl in der Menge, in dem Charakter ihrer Arbeiten, wie in ihrem Einflusse auf andere, noch weniger hervortretende Nationen. Die Mitglieder der russischen Akademie waren in ihren bedeutendsten

Gliedern jetzt Deutsche, und die Gelehrten der skandinavischen Nationen standen wenigstens mit Deutschland in innigster Verbindung. Uebrigens stellte sich immer mehr in Europa das wissenschaftliche Gleichgewicht unter den Nationen her, und die Wissenschaft errang sich immer mehr den neutralen, internationalen Charakter, den sie sich glücklicher Weise, trotz mancher Versuche, sie national zu fructificiren, bis heute bewahrt hat.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

Newton hatte die, von Gassendi und Boyle wieder erweckte, antike Atomistik als Grundlage seiner Anschauung von der Materie angenommen, ohne sich genauer darüber auszulassen, ob und wie diese Atomistik den neuen Ansichten gemäss zu modificiren sei. Seine Nachfolger legten sich danach die Sache jeder auf seine eigene Hand zurecht, unterliessen aber ebenfalls die Ausbildung einer Theorie der Atome, die als hypothetisch und philosophisch verdächtig werden konnte. Erst Boscowich versuchte den alten Atomen die neuen Anziehungs- und Abstossungskräfte organisch einzupflanzen und so das Neue mit dem Alten systematisch zu verbinden.

Von einem entgegengesetzten Standpunkte ging nun Lesage [1]) aus, indem er sich zu zeigen bemühte, dass die alte Atomistik auch ohne Aufnahme neuer Principien, ohne die Annahme von Kräften, welche dem alten Begriff der Atome principiell fremd, den Anschauungen Newton's zu entsprechen vermöge. Ja in einer Abhandlung, welche unter dem Titel Lucrèce Newtonien im Jahre 1784 [2]) erschien, unternahm er sogar den Beweis, dass die alte Atomistik bei richtiger Ausbildung von selbst zur Newton'schen Physik führen müsse. „Wenn die ersten Epikureer, sagt Lesage, über die Kosmographie eben so gesunde Ideen gehabt hätten als mehrere von ihren Zeitgenossen, welche sie zu hören vernachlässigten, und wenn sie in der Geometrie nur einen Theil der Kenntnisse besessen hätten, welche damals schon gemein waren, so würden sie sehr wahrscheinlich ohne Anstrengung das Gesetz der allgemeinen Schwere und seine mechanische Ursache entdeckt haben. Das Gesetz, dessen Erfindung und Beweis den grössten Ruhm des mächtigsten Genies bilden, welches jemals existirt hat, und die Ursache, welche, nachdem sie während langer Zeit den Ehrgeiz der grössten Physiker gebildet hat, gegenwärtig ihre Nachfolger in Verzweiflung setzt.“

---

[1]) George Louis Lesage (13. Juni 1724 Genf — 9. November 1803 Genf), lebte als Lehrer der Mathematik in seiner Vaterstadt. Der eifrigste Anhänger von Lesage war P. Prevost, welcher einen Traité de physique, rédigé d'après les notes de Mr. Le Sage (Genf 1818) herausgab.

[2]) Nouv. Mém. de l'Acad. Roy. für 1782, Berlin 1784, S. 404 bis 432.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

„Trotz des Vorzuges, welchen die Untersuchungen a posteriori verdienen, sollten diejenigen, welche a priori geschehen, nicht ganz verworfen werden, denn sie können sehr beträchtlich den Erfolg der ersteren beschleunigen.“ „Nicht dass man sich den Speculationen nur überlassen soll, um nicht unthätig zu bleiben, wenn es an der Geschicklichkeit und an der Art von Geduld fehlt, welche nöthig sind, um neue Beobachtungen und Erfahrungen zu machen; man soll sich vielmehr sorgfältig bekannt machen mit allen Beobachtungen und Erfahrungen (expériences), welche über den Gegenstand, welchen man gewählt hat, schon erhalten sind, man soll dieselben bei der Bildung der Hypothesen nie aus den Augen lassen, man soll endlich mit allen Hülfsmitteln der Mathematik die ersteren immerwährend und sorgfältig auf die letzteren anwenden, um zu prüfen, ob ihre Uebereinstimmung überall genau und sicher ist. Auch ist es vielmehr eine solche Uebereinstimmung als die beste mathematische Deduction, welche eine wahrhafte, tiefe Ueberzeugung in den meisten Lesern einer physikalischen Theorie hervorbringt.“

„Wenn die Schüler des Epikur ebenso überzeugt gewesen wären von der Kugelgestalt der Erde, als sie geneigt waren, die Erdoberfläche für eben zu halten, so würden sie (bei ihrer Erklärung der Welt) nicht die Bewegung der Atome parallel angenommen haben (um sie senkrecht auf die ebene Oberfläche treffen zu lassen); sie würden ihnen vielmehr eine Bewegung senkrecht zur Oberfläche der Kugel zuertheilt haben, so dass alle Atome sich gegen das Centrum bewegt hätten, wie wenn es in allen Theilen der Welt hagelte.“

Dagegen würde man ihnen vielleicht Einwürfe, wie den folgenden gemacht haben. Ein Theil jener Atome müsse nach ihrer Annahme, bevor er zu uns kommen könnte, auf den Mond treffen und diesen gegen uns stossen; dafür könnten die Körper unmittelbar unter dem Monde nur um so viel weniger von stossenden Atomen getroffen werden. Danach müsste man also bemerken, dass der Mond zu uns herniederstiege und dass eine Partie der oceanischen Gewässer sich aufwärts gegen den Mond bewege. Dadurch aber gerade würden die Epikureer gezwungen worden sein zu prüfen, ob nicht in der That eine solche Bewegung, ähnlich diesen beiden Folgerungen geschehe; und sie würden dann ihren Widersachern geantwortet haben, dass zwar der Stoss der Atome den Mond der Erde nicht nähere, dass er aber, was ganz dasselbe sei, den Mond hindere, sich in der Richtung der Tangente seiner Bahn von der Erde zu entfernen, und dass die abwechselnde Bewegung des Oceans gegen den Mond hin wirklich ganz in derselben Weise stattfinde, wie es der Theorie nach sein müsse. Auf Grund ähnlicher Theoreme über die Centrifugalkraft, wie sie Huyghens entwickelt hat, wäre dann

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

weiter der Einwurf möglich gewesen: Wenn die Geschwindigkeit des Mondes der Schwere, wie sie an der Oberfläche der Erde herrscht, das Gleichgewicht halten solle, so dass der Mond sich weder entfernen noch nähern könne, so würde diese Geschwindigkeit 60 mal grösser sein müssen, als sie in Wirklichkeit ist. Dagegen würden die Epikureer siegreich erwidert haben: Das Centrum des Mondes sei 60 mal weiter vom Centrum der Erde entfernt als die Oberfläche derselben; die sphärische Fläche, auf welcher der Mond stehe, sei also 3600 mal grösser als diejenige der Erde, und da die erstere nicht von einer grösseren Anzahl von Atomen getroffen würde als die letztere, so müsste die Schwere auf dem Monde 3600 mal so klein sein als auf der Erde, und das wäre gerade die Schwere, welcher die wirklich stattfindende Bewegung des Mondes das Gleichgewicht halten könnte.

Um die Bildung der zusammengesetzten Körper zu erklären, war Epikur genöthigt gewesen, den bei Demokrit parallelen Bewegungen der Atome eine kleine Neigung zu ertheilen; es ist bekannt, dass die Einführung dieser Verbesserung ihm viel Spötterei und Einwürfe von Seiten der Philosophen anderer Schulen zugezogen hat. Hätte aber Epikur die Richtung der Atome nach einem Centrum angenommen, so wäre dadurch von selbst gegeben gewesen, dass jeder Horizont von Theilchen jeder Richtung getroffen wird. Dem Einwurf, dass alle fallenden Körper doch nur senkrecht gegen den Horizont getrieben werden, hätte er leicht begegnet. Der Stoss aller von oben kommenden Atome wird sich, da eben alle Richtungen vertreten sind, zu einer Resultante zusammensetzen, die in der Richtung des Lothes liegt. Die von unten kommenden Atome, welche durch die Erde hindurchschlüpfen, würden allerdings diesen ersteren entgegen wirken, aber da die Erde bei ihrer grossen Dicke eine ganze Menge derselben aufhalten muss, so würde auch trotz der Gegenwirkung der durchgehenden Atome noch eine verhältnissmässige Wirkung nach unten übrig bleiben.

Hätten dann weiter die Epikureer auch die Lehre von der Bewegung der Erde angenommen, so würden sie auch noch einen Schritt weiter haben thun müssen, der auch die ihrem System fremde Regelmässigkeit des Zieles aller Bewegungen nach einem festen Punkte wieder aufgehoben hätte. Wenn sich die Erde bewegt, so wird sie in jedem Augenblicke an einem anderen Orte von einem anderen Atomhagel getroffen. Die Constanz der Wirkung der Schwere muss also zu der Annahme zwingen, dass durch jeden Punkt des Raumes in gleicher Weise Atomströme nach allen Richtungen gehen, so dass die Erde nun in allen Punkten ihrer Bahn ganz dieselben Wirkungen erleidet. Wären aber die Atomistiker einmal so weit gewesen, so würden die am meisten nachdenklichen unter ihnen den Faden auch weiter verfolgt haben, und diese müssten dann zu folgenden Propositionen gekommen sein: 1) Da jedes Atom, welches an einem Centralkörper vorüber-

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

geht, durch ein entgegengesetztes in seiner Wirkung aufgehoben wird, so üben nur diejenigen Einfluss auf die Schwere, welche direct nach der Oberfläche des Centralkörpers gerichtet sind, und die Schwere ist demnach, wie leicht einzusehen, umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung der schweren Körper vom Centralkörper. 2) Da die schwermachenden Atome nicht einzig gegen das Centrum des ganzen Körpers gerichtet sind, sondern sich gegen alle Theile desselben bewegen, so werden sie die Körper, welche sie auf ihrem Wege treffen, nicht gegen einen Stern im Ganzen, sondern nur gegen seine einzelnen Theile treiben, so dass die Bewegung gegen das Centrum nichts ist, als das Resultat der Bewegung gegen die einzelnen Theile desselben; darum muss diese Schwere proportional sein der Zahl dieser Theile, oder mit anderen Worten proportional der Masse des Centralkörpers. Aus diesen beiden Propositionen würde man endlich die ganze Theorie der allgemeinen Schwere ableiten können, ohne die schwermachenden Atome selbst wieder zu erwähnen. Der Satz von der Gleichheit der Wirkung und Gegenwirkung aber folgt direct aus der nachgewiesenen Art des Zustandekommens der allgemeinen Schwere. Diejenigen Atome nämlich, welche einen Körper gegen einen anderen stossen, wirken nur deswegen, weil sie durch den anderen Körper von ihren Antagonisten befreit sind, und diese Antagonisten sind es auf der anderen Seite, welche den zweiten Körper zu dem ersten hintreiben. Da nun die Antagonisten bei entgegengesetzter Richtung gleiche Kraft haben, so ist damit jener Satz bewiesen.

Hiernach bemüht sich Lesage noch genauer zu zeigen, wie weit die Epikureer auf Grund jener Sätze und auf Grund ihrer geometrischen Kenntnisse in der Theorie der allgemeinen Schwere hätten vordringen und wohl auch ihre Resultate durch Beobachtungen verificiren können; dann führt er seine Theorie weiter zur Ableitung der Gesetze fallender Körper. Die Stösse der Atome, welche noch schneller als das Licht sind, werden, wenn ein Körper drei oder vier Secunden gefallen, für unsere Empfindung noch eben so stark sein, als wenn der Körper erst eine oder zwei Secunden gefallen ist, trotzdem sie den schon bewegten Körper mit etwas geringerer Kraft treffen. Schon die Geschwindigkeit des Schalles, als Geschwindigkeit der Atome würde genügen, um die Unterschiede der Beschleunigung unmerkbar werden zu lassen; denn die Schallgeschwindigkeit ist 34 mal so schnell als die eines fallenden Körpers am Ende der ersten Secunde, oder 17 mal so schnell als am Ende der zweiten Secunde; die Acceleration würde also bei einer Geschwindigkeit der Atome gleich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles am Ende der ersten Secunde um $^1/_{34}$, am Ende der zweiten um $^2/_{34}$ sich verkleinert haben, was für unsere Sinne unerkennbar wäre. Bei einer Geschwindigkeit der Atome gleich der des Lichtes würden aber die Verminderungen der Beschleunigung nur den 900 000ten Theil dieser

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

Verminderungen betragen. Die Beschleunigungen, welche der Körper durch die immer in gleichen Zeiten auftreffenden Stösse der Atome erfährt, müssen also in gleichen Zeiten ebenfalls gleich sein, wenigstens in so weit als unsere Empfindung richten kann. Daraus folgt die Proportionalität der erlangten Geschwindigkeiten mit den verflossenen Zeiten, und daraus folgen schliesslich alle Bewegungsgesetze fallender Körper [1]).

Lesage ist sich wohl bewusst, dass er hier der Mechanik mit seiner Hypothese sehr wichtige Dienste leistet. Er weist ausdrücklich darauf hin, dass Galilei und alle Nachfolger das Gesetz der immerwährend gleichen Zunahme der Geschwindigkeiten nur mit Hülfe des Summationsgesetzes der Geschwindigkeiten gefunden, und dass sie dieses Summationsgesetz nur als eine besondere Hypothese annehmen konnten, welche durch Erfahrung erst bewahrheitet werden musste, während bei ihm die Constanz der Fallbeschleunigung ohne weitere Hypothese aus seiner fundamentalen Annahme folgt. Dafür macht er sich selbst einen weiteren Einwurf, dem sich nothwendiger Weise alle Physiker aussetzen müssen, welche die Schwere mechanisch erklären wollen: Wenn ein Stoss der Atome die Ursache der Schwere wäre, so müsste das Gewicht der Körper ihrer Oberfläche, oder vielmehr ihrer horizontalen Projection proportional sein; wie kommt es denn, dass dieses Gewicht ihrer Masse proportional sein soll? Wenn ein Körper innerhalb eines Hauses unter einem Dach gewogen wird, sollte er nicht daselbst, wo viele der schwermachenden Atome durch das Dach abgehalten werden, von geringerer Schwere sein als im Freien? Darauf aber würden schon die Epikureer sicher geantwortet haben, dass die Atome ohne Zweifel eben so frei durch die Körper hindurch gingen als das Licht z. B. durch den Diamanten und die magnetische Materie durch das Gold. Die Zahl der Atome, welche durch die ersten Schichten eines schweren Körpers zurückgehalten würden, könne als absolut unbemerklich gegenüber der Zahl derjenigen angenommen werden, welche bis zu den letzten Schichten durchdrängen. Und trotzdem sei ganz gut zu begreifen, wie die zurückgehaltenen Atome auf die ersten Schichten des Körpers eine bemerkbare Wirkung hervorzubringen vermöchten, weil sie durch ihre ungeheure Geschwindigkeit das ersetzten, was ihnen an Masse abgehe.

Eine zweite Schwierigkeit könnte noch vorsichtige Atomisten schrecken, nämlich die Idee, dass die Atome sich selbst unter einander treffen und so ihre schwermachende Kraft schwächen könnten, wonach ja die Bewegung der Atome mit der Zeit von

[1]) Lesage bemerkt dazu, dass bei Annahme einer Proportionalität der Zeiten und der Geschwindigkeiten die letzteren allerdings, wie die ersteren als continuirlich wachsend gedacht werden müssen; es falle aber diese Inconvenienz weg, wenn man Zeitintervalle annehme, die den Intervallen des Stosses der Atome gleich seien.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

selbst verlöschen müsste. Es würde hier unthunlich sein zu antworten, dass die Summe der Bewegung selbst bleibe, wenn man dieselbe algebraisch nehme, denn es ist nicht zu leugnen, dass dieser Begriff von der Erhaltung der Bewegung keinen Sinn hat, weil zwei gleiche entgegengesetzte Kräfte vor dem Stosse eine Wirkung leisten könnten, obwohl ihre Wirkungsfähigkeit nach demselben Null ist. Dem gegenüber bleibt in der That nichts anderes übrig, als die Zwischenräume zwischen den Atomen im Verhältniss zu der Grösse derselben so sehr als möglich zu vergrössern, und da man hierin volle Freiheit hat, so wird man diese Entfernungen im Vergleich zu der Dimension der Atome unendlich gross denken, worauf dann die Wahrscheinlichkeit eines Zusammentreffens der schwermachenden Atome unendlich klein wird. Nach dem allen aber wird man schliesslich noch die Frage aufwerfen müssen, wie es möglich ist, dass die Himmelskörper trotz der überall vorhandenen Atomströme bei ihrer Bewegung durch den Himmelsraum doch keine Verzögerung dieser Bewegungen zeigen. Doch ist auch hierauf leicht zu antworten. Da die Schwere verursacht wird durch einen Strom von Atomen, welche ihrer Antagonisten beraubt sind, so ist dieselbe unter sonst gleichen Umständen dem Quadrate der Geschwindigkeit dieser Atome proportional. Die Verzögerung, welche die Himmelskörper in ihrer Bewegung erleiden, wird dagegen durch das Product aus der einfachen Geschwindigkeit der Atome und der Geschwindigkeit der schweren Körper selbst gemessen [1]). Es verhält sich also die Schwere der Himmelskörper zu der Verzögerung ihrer Bewegung wie die Geschwindigkeit der schwermachenden Atome zu der Geschwindigkeit der Himmelskörper selbst. Da aber dieses Verhältniss als unendlich klein angenommen werden kann, so ist die Verzögerung der circulirenden Himmelskörper im Verhältniss zur Schwere derselben unendlich klein und damit überhaupt unmerklich.

Damit hält Lesage die Zahl der Einwürfe für abgeschlossen, die man seinem System mit einigem Anschein von Recht entgegenhalten könnte. Er betrachtet dasselbe als so naheliegend und selbstverständlich, dass er nach den Ursachen sucht, welche die

[1]) Um zu beweisen, dass die Hemmung, welche circulirende Himmelskörper durch die Atomströme erleiden, dem Product aus den beiderseitigen Geschwindigkeiten proportional ist, braucht man nur Atomströme in Betracht zu ziehen, welche der Bahn des Körpers parallel sind. Die Kräfte, welche anders gerichtete Ströme ausüben, kann man in zwei Componenten parallel und senkrecht zur Bahn zerlegen; die letzteren bleiben ohne Wirkung, weil sie sich gegenseitig aufheben. Die Hemmungen der parallelen Ströme sind gleich den Differenzen aus der Hemmung des der Bewegung des Körpers widerstehenden Stromes und der Acceleration seines Antagonisten. Bezeichnen wir die Geschwindigkeit der Atome mit $u$, die des schweren Körpers mit $v$, so ist die resultirende Hemmung proportional der Differenz $(u + v)^2 - (u - v)^2$ oder dem Product $4uv$ oder dem einfachen Product $uv$. q. e. d.

Physiker abhalten konnten, dasselbe schon vor ihm auszubilden. Solcher erklärender Ursachen findet er vier: 1) Das Ungeschick einiger Physiker, das Chaos mannigfaltig bewegter Atome dem Calcül zu unterwerfen, 2) den Aberglauben anderer, die Ursache der Schwere sei unmöglich zu finden, 3) die Furcht, durch Aufstellen neuer Systeme äussere Vortheile zu verlieren, und endlich 4) die mangelnde Einsicht in die Fruchtbarkeit der neuen Theorie.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

So hat Lesage mit grosser Kühnheit, aber auch unläugbarer Genialität ein System aufgestellt, welches nicht nur die Ursache der Schwere aufdeckt, sondern auch viele Schwierigkeiten der Dynamik überhaupt in überraschend anschaulicher Weise löst. Er hat gezeigt, wie die scheinbare Attraction der Materie, die Niemand zu begreifen vermag, anschaulich durch den Stoss einer schwermachenden Materie erklärt werden kann. Er hat aus seiner Hypothese die beiden charakteristischen Gesetze der allgemeinen Gravitation sicher abgeleitet; er hat gezeigt, dass die allgemeine Gravitation allen irdischen Körpern zukommen muss. Auch das Gesetz von der Summation der Geschwindigkeiten, das bei Galilei noch eine zweifelhafte Rolle spielt, das bei Newton einfach als ein Axiom auftritt, hat Lesage vollkommen sicher und anschaulich aus dem Fundament seines Systems deducirt[1]). Auch ist Lesage überall originell gewesen. Seine Fiction, dass die Epikureer nur aus unverzeiblicher Nachlässigkeit die Entdeckung ihm nicht vorweggenommen, ist jedenfalls von seiner Seite selbst nicht ernsthaft gemeint und hat wohl nur den Zweck, seiner Arbeit den Anstrich verhasster Neuerung zu nehmen.

Auf der anderen Seite darf man freilich auch nicht verkennen, dass sein Versuch einer Constituirung der Materie eben weiter nichts als ein Versuch ist. Sein Hauptzweck, eine Erklärung der Schwere aller Materie zu geben, ist am ehesten erreicht, aber auch dabei bleiben noch bedenkliche, hypothetische Reste. Die Grundhypothese von den nach allen Richtungen durch jeden Punkt des Raumes gehenden Atomströmen ist eine starke Zumuthung, der man nicht ohne eine gründliche Ueberzeugung von der Fruchtbarkeit der Hypothese zustimmen wird. Die andere Annahme aber, dass durch die allerdings seltenen Zusammenstösse von Atomen lebendige Kraft verloren gehen könnte, ist für den Physiker schlechterdings unmöglich. Man könnte dem Dilemma entgehen, wenn man die schwermachenden Atome als absolut elastisch annehmen wollte; dann aber würde der Begriff der Elasticität, zu dessen Erklärung die Atomtheorie die Grundlage liefern soll, wieder von dieser vorausgesetzt werden. Oder man könnte anneh-

[1]) Einige unserer Lehrbücher der Physik führen das Summationsgesetz auf Newton zurück. Mit welchem Recht sie Galilei's ältere Ansprüche dabei übergehen, ist mir unerfindlich.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

men, dass jener fragliche Verlust an lebendiger Kraft nur ein scheinbarer sei und nur eine Umwandlung der Massenbewegung der Atome in eine innere Bewegung der einzelnen Theile bedeute. Damit aber würde man die Atome wieder als Complexe von Atomen zweiter Ordnung betrachten müssen und danach würde überhaupt die Materie als ein Zusammengesetztes aus Zusammengesetztem u. s. f. bis in infinitum erklärt werden [1]).

Indessen würden diese Schwierigkeiten, die jeder Atomentheorie anhaften und vielleicht in der Natur unseres Erkenntnissvermögens ihre letzte Ursache haben, wohl zu ertragen sein, wenn nur nicht der Versuch von Lesage auch nach anderen Richtungen hin unvollendet geblieben wäre. Die Erscheinungen der Gravitation hatte Lesage aus seiner Hypothese der schwermachenden Atome abgeleitet, weiter aber war er in seinen Deductionen nicht gekommen. Die damals gerade so gewaltiges Aufsehen erregenden Entdeckungen der specifischen Wärme, der Schmelzwärme etc., die Wirkungen der Elektricität und des Magnetismus, die Möglichkeit der verschiedenen chemischen Elemente, ihrer Verbindungen und Trennungen blieben noch gänzlich unerklärt. Ob diese Dinge überhaupt von seinem System aus erklärt werden könnten und auf welche Weise das geschehen sollte, darüber hatte Lesage sich nicht specieller ausgelassen, und jedenfalls erschien diese Erklärung schwerer als der Aufbau der Grundlagen des Systems selbst. Diese letzteren Umstände trugen wohl die Hauptschuld an der merkwürdig kühlen Aufnahme des Systems.

Das Gesetz der allgemeinen Schwere war durch tausendfältige Beobachtungen bewahrheitet, seine Anwendung war so sicher und fruchtbar, dass man sich für eine theoretische Begründung desselben kaum interessirte; wenn man nicht überhaupt solche Speculationen, die über die Thatsachen und ihre Gesetzmässigkeit hinaus gingen, für wissenschaftlich gefährlich, oder für moralisch schlecht hielt. Einen Nutzen der Theorien des Lesage für andere physikalische Disciplinen konnte man noch nicht erkennen und versprach man sich auch kaum von ihnen. So liess man Lesage mit williger Anerkennung desselben als eines geistreichen Philosophen weiterhin unbeachtet, führte ihn noch hier und da namentlich an, beschäftigte sich aber nicht weiter mit seinem System. Fischer [2]) giebt in seiner Geschichte der Physik einige Sätze von den Ansichten des Lesage und findet sich dann mit der Bemerkung ab: „Wenn diese Postulate zugegeben werden, so ist es gar keinem Zweifel unterworfen, dass die mechanisch-atomistische Physik den ausgezeichneten Vortheil

---

[1]) Einen dritten Versuch (elastischer Stoss ohne elastische Atome) zur Vermeidung des Dilemmas enthält Lasswitz, Atomistik und Kriticismus, Braunschweig 1878, S. 96 bis 106. Wir werden auf dieses Thema noch zurückkommen.

[2]) Geschichte der Physik, VI, S. 18.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820

hat, alles anschaulich zu machen, was die dynamische Physik nie in der Anschauung darzustellen vermag. Dies ist auch der Grund, warum sich die mechanische Physik so lange in Ansehen erhalten hat und immer noch ihre Verehrer findet". Muncke sagt in Gehler's physikalischem Wörterbuch [1]): „Am meisten Aufsehen erregte in den neueren Zeiten das System des Lesage, nach welchem die Materie aus Atomen besteht, die durch eine eigenthümlich mit ihnen verbundene Potenz, einen gewissen ätherischen Stoff bewegt wird. Nimmt man diese Hypothese, die etwa ausser Prevost kaum jemand als Anhänger gefunden hat, in ihrer ganzen Strenge, so werden alle Kräfte, wenigstens alle ursprünglichen oder Grundkräfte, aus der Natur verbannt; aber es scheint mir überflüssig, selbst nur die Ideen des Lesage und die Anwendung, welche er selbst und Prevost auf die Naturerscheinungen davon gemacht hat, näher anzugeben". Seit in der neuesten Zeit der Gedanke an eine Ursache der Schwerkraft, die dieselbe mit den anderen Kräften der Natur in Verbindung bringt, lebhafter wieder beachtet wird, hat man zwar wieder mehrfach an Lesage erinnert; aber auch heute noch wird viel mehr sein Name genannt und seine Abhandlung citirt, als dass die letztere vollständig gelesen und gründlich geprüft wird.

Lesage hat in seiner Arbeit zuerst ein eng begrenztes Ziel im Auge. Er will die Atomistik mit den Newton'schen Principien in Einklang bringen, aus der alten atomistischen Theorie heraus alle Erscheinungen der allgemeinen Attraction ableiten, und von diesem Punkte aus kommt er nur flüchtig zu einer Constitution der Materie. Einen entgegengesetzten Weg ging um dieselbe Zeit **Kant** [2]). Kant fasst sein Problem so allgemein und so principiell wie möglich. Nachdem er in seiner Kritik der reinen Vernunft die Gesetze jeder möglichen Erfahrung festgestellt, muss er nun specieller auf dieselbe eingehen. Alle Gegenstände sind entweder Gegenstände des äusseren oder Gegenstände des inneren Sinnes; die ersteren bilden die ausgedehnte, die zweiten die denkende Natur. Nach dem gewöhnlichen Gebrauche nennt man nur die Betrachtung der ersteren Naturwissenschaft. Dieser Naturwissenschaft liegen zu Grunde die Körper und damit die Materie. Soll aber die Betrachtung der Natur wirkliche Wissenschaft sein, so müssen ihre Begriffe erst auf ihre Nothwendigkeit untersucht werden, und damit erhebt sich für eine kritische Philosophie die erste Frage: Wie ist Materie als Object unserer Erkenntniss möglich?

---

[1]) 2. Auflage, VI, S. 1397.

[2]) Immanuel Kant wurde am 22. April 1724 in Königsberg in Preussen geboren. Seit 1740 studirte er in Königsberg Theologie, Philosophie und Mathematik. Von 1746 bis 1755 war er Hauslehrer; im letzteren Jahre habilitirte er sich in Königsberg und las über Mathematik, Physik, Logik, Metaphysik, Moral und philosophische Encyklopädie, später auch über natürliche Theologie und Anthropologie. 1770, also 46 Jahre alt, wurde er ordentlicher Professor der Logik und Metaphysik. 1797 gab er seine Vorlesungen wegen eintretender Altersschwäche auf. Er starb am 12. Februar 1804 in Königsberg.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

Diese Frage ist es, mit der sich Kant am ersten nach seiner Hauptarbeit, der Kritik der reinen Vernunft, beschäftigt, und schon fünf Jahre nach dem Erscheinen dieses Werkes beantwortete er jene Frage nach der Materie in der Schrift „Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft". (Riga 1786).

Die Abhandlung hat es nur zu thun mit der Möglichkeit der Materie überhaupt. Sie zeigt allerdings, welcher Begriff der Materie der einzig mögliche ist, d. h. sie construirt vollständig die Materie; aber sie behandelt keineswegs die Folgen dieser Construction, und sie geht principiell nicht ein in die Untersuchung der Eigenschaften und Bestimmtheiten einzelner Stoffe. Die metaphysischen Anfangsgründe der Naturwissenschaft gehören also durchaus zur Metaphysik; sie geben die Bedingungen für die Möglickeit aller Naturwissenschaften, sind aber darum selbst keine Naturwissenschaft. Für das Verständniss des Werkes ist dieses wohl zu beachten, und die Annahme, als sei mit der Metaphysik schon die Physik selbst begonnen, könnte nur zu gänzlichem Missverständniss dieser Kant'schen Arbeit führen.

Soll aber die Metaphysik der Naturwissenschaft eine Garantie der Vollständigkeit bieten, so muss nothwendiger Weise ihr Gegenstand nach dem Schema der reinen Verstandesbegriffe, nach der Tafel der Kategorien behandelt werden. „Unter die vier Klassen derselben, die der Grösse, der Qualität, der Relation und endlich der Modalität müssen sich auch alle Bestimmungen des allgemeinen Begriffs einer Materie überhaupt, mithin auch Alles, was a priori von ihr gedacht, was in der mathematischen Construction dargestellt, oder in der Erfahrung als bestimmter Gegenstand derselben gegeben werden mag, bringen lassen." „Die Grundbestimmung eines Etwas, das ein Gegenstand äusserer Sinne sein soll, musste Bewegung sein; denn dadurch allein können diese Sinne afficirt werden. Auf diese führt auch der Verstand alle übrigen Prädikate der Materie, die zu ihrer Natur gehören, zurück, und so ist die Naturwissenschaft durchgängig eine entweder reine oder angewandte Bewegungslehre. Die metaphysischen Anfangsgründe der Naturwissenschaft sind also unter vier Hauptstücke zu bringen, deren erstes die Bewegung als ein reines Quantum, nach seiner Zusammensetzung, ohne alle Qualität des Beweglichen betrachtet und Phoronomie genannt werden kann, das zweite sie als zur Qualität der Materie gehörig, unter dem Namen einer ursprünglich bewegenden Kraft, in Erwägung zieht und daher Dynamik heisst, das dritte die Materie mit dieser Qualität durch ihre eigene Bewegung gegen einander in Relation betrachtet und unter dem Namen Mechanik vorkommt, das vierte aber ihre Bewegung oder Ruhe bloss in Beziehung auf die Vorstellungsart oder Modalität, mithin als Erscheinung äusserer Sinne bestimmt und Phänomenologie genannt wird."

„Da in der Phoronomie von nichts, als Bewegung geredet werden

soll, so wird dem Subject derselben, nämlich der Materie, hier keine andere Eigenschaft beigelegt, als die Beweglichkeit." „Materie ist also das Bewegliche im Raume."

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

„In aller Erfahrung muss etwas empfunden werden, und das ist das Reale der sinnlichen Anschauung; folglich muss auch der Raum, in welchem wir über die Bewegungen Erfahrung anstellen sollen, empfindbar, d. i. durch das, was empfunden werden kann, bezeichnet sein, und dieser, als der Inbegriff aller Gegenstände der Erfahrung und selbst ein Object derselben, heisst der empirische Raum. Dieser aber, als materiell, ist selbst beweglich." „Also ist alle Bewegung, die ein Gegenstand der Erfahrung ist, bloss relativ; der Raum, in dem sie wahrgenommen wird, ist ein relativer Raum, der selbst wiederum, und vielleicht in entgegengesetzter Richtung, in einem erweiterten Raume sich bewegt, mithin auch die in Beziehung auf den ersteren bewegte Materie in Verhältniss auf den zweiten Raum ruhig genannt werden kann; und diese Abänderungen des Begriffs der Bewegungen gehen mit der Veränderung des relativen Raumes so ins Unendliche fort. Bewegung eines Dinges ist die Veränderung der äusseren Verhältnisse desselben zu einem gegebenen Raume. Ruhe ist die beharrliche Gegenwart (praesentia perdurabilis) an demselben Orte; beharrlich aber ist das, was eine Zeit hindurch existirt, d. i. dauert. Den Begriff einer zusammengesetzten Bewegung construiren, heisst eine Bewegung, sofern sie aus zweien oder mehreren gegebenen in einem Beweglichen vereinigt entspringt, a priori in der Anschauung darstellen." Danach erklärt Kant die Zusammensetzung von Bewegungen, ganz in derselben Weise wie Newton[1]), durch Bewegung in Räumen, die selbst wieder bewegt sind, und selbst das Galilei'sche Gesetz der Summation der Geschwindigkeiten kann er sich nur auf solche Weise zurecht legen. „Wenn z. B. eine Geschwindigkeit doppelt genannt wird, so kann darunter nichts Anderes verstanden werden, als dass sie aus zwei einfachen und gleichen bestehe." „Diese Construction ist aber auf keine andere Art möglich, als durch die mittelbare Zusammensetzung zweier gleichen Bewegungen, deren eine die des Körpers, die andere des relativen Raumes in entgegengesetzter Richtung, aber eben darum mit einer ihr gleichen Bewegung des Körpers in der vorigen Richtung völlig einerlei ist." Denn „es ist nicht für sich klar, dass eine gegebene Geschwindigkeit aus kleineren und eine Schnelligkeit aus Langsamkeiten ebenso bestehe, wie ein Raum aus kleineren"; „denn in derselben Richtung lassen sich zwei gleiche Geschwindigkeiten in einem Körper gar nicht zusammensetzen, als nur durch äussere bewegende Ursachen, z. B. ein Schiff, welches den Körper mit einer dieser Geschwindigkeiten trägt, indessen dass eine andere mit dem Schiffe unbeweglich verbundene bewegende Kraft dem Körper die zweite, der vorigen gleiche,

[1]) Siehe Bd. II. dieses Werkes, S. 227.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

Geschwindigkeit eindrückt, wobei doch immer vorausgesetzt werden muss, dass der Körper sich mit der ersten Geschwindigkeit in freier Bewegung erhalte, indem die zweite hinzukommt".

In der Dynamik erweitert sich entsprechend der neuen Betrachtungsweise die Definition der Materie. „Materie ist das Bewegliche, sofern es einen Raum erfüllt." „Die Materie erfüllt (aber) einen Raum nur durch bewegende Kraft, und zwar eine solche, die dem Eindringen anderer, d. i. der Annäherung widersteht. Nun ist diese eine zurückstossende Kraft. Also erfüllt die Materie ihren Raum nur durch zurückstossende Kräfte und zwar aller ihrer Theile, weil sonst ein Theil ihres Raumes (wider die Voraussetzung) nicht erfüllt, sondern nur eingeschlossen sein würde. Die Kraft aber eines Ausgedehnten vermöge der Zurückstossung aller seiner Theile ist eine Ausdehnungskraft (expansive). Also erfüllt die Materie ihren Raum nur durch eine ihr eigene Ausdehnungskraft, welches das Erste war." Da mit dem Zusammendrücken einer Materie die repulsive Kraft derselben wachsen muss, so würde zur vollkommenen Durchdringung (d. h. zur vollkommenen Aufhebung der Ausdehnung) einer Materie durch eine andere, eine unendlich grosse Kraft nöthig sein. Weil eine solche nicht existiren kann, ist jeder Materie Undurchdringlichkeit eigen. Die repulsive Kraft der Materie macht auch das Dasein eines leeren Raumes unmöglich, und da der Raum bis ins Unendliche theilbar ist und jeder Theil immer von Materie erfüllt sein muss, so folgt daraus auch die unendliche Theilbarkeit (jedoch nicht das factische Getheiltsein) der Materie. Indessen ist aus einer Repulsivkraft allein die Materie nicht zu construiren; denn durch ihre repulsive Kraft allein „wenn ihr nicht eine andere bewegende Kraft entgegenwirkte, würde die Materie innerhalb keiner Grenzen der Ausdehnung gehalten sein, d. i. sich ins Unendliche zerstreuen, und in keinem anzugebenden Raume würde eine anzugebende Quantität Materie anzutreffen sein. Es erfordert also alle Materie zu ihrer Existenz Kräfte, die der ausdehnenden entgegengesetzt sind, d. i. zusammendrückende Kräfte. Diese können aber ursprünglich nicht wiederum in der Entgegenstrebung einer anderen Materie gesucht werden; denn diese bedarf, damit sie Materie sei, selbst einer zusammendrückenden Kraft. Also kommt aller Materie eine ursprüngliche Anziehung, als zu ihrem Wesen gehörige Grundkraft, zu."

Kant übersieht dabei nicht die merkwürdige Thatsache, dass man die Undurchdringlichkeit der Materie als Grundbedingung derselben leicht erkennt [1]), die Attraction aber nicht. Er erklärt dies aus der

---

[1]) Leibniz sagt in Briefen an des Bosses (Gerhardt, Leibniz's phil. Schriften II, S. 324): Gott könnte eine Substanz wohl der materia secunda (nach aussen, in die Ferne wirkend), aber nicht der materia prima (die undurchdringlich ist) berauben, denn dadurch würde er einen totus purus actus herstellen, und dies letztere ist er ganz allein.

Thatsache, dass die Repulsivkraft überall an den Grenzen sich geltend macht, während die Attraction, als eine mehr innere Wirkung, die man auch ohne Weiteres in einen Punkt, den Schwerpunkt, verlegt denken kann, uns nicht in die Sinne fällt. Das scheint mir indessen mehr eine weitere Auseinandersetzung als eine Erklärung der Thatsache, dass niemals die Undurchdringlichkeit, oftmals aber die wechselseitige Anziehung der Materie von Physikern und Philosophen geleugnet worden ist. Kant bemüht sich freilich, das Verhältniss in der Auffassung dieser beiden Kräfte umzukehren und sogar die Attraction als die ursprünglichste darzustellen. Er weist auch alle Gründe gegen die actio in distans unbedingt zurück. Jedes Ding wirkt auf ein anderes nur da, wo es nicht ist; denn selbst wenn sich zwei Körper berühren, ist keiner der beiden in dem Wirkungspunkte, dem Berührungspunkte, enthalten. Ja er versucht sogar die Behauptung zu widerlegen, dass Newton die Frage nach der Ursache der Gravitation ganz offen gelassen habe, kommt aber dabei nur zu dem etwas fragwürdigen Satze: „Allein wie konnte er (Newton) den Satz gründen, dass die allgemeine Anziehung der Körper, die sie in gleichen Entfernungen um sich ausüben, der Quantität ihrer Materie proportionirt sei, wenn er nicht annahm, dass alle Materie, mithin bloss als Materie und durch ihre wesentliche Eigenschaft, diese Bewegungskraft ausübe?" Dabei aber kann auch Kant die beiden primitiven Kräfte der Materie nicht als von ganz gleichen Qualitäten ausgeben, weil sich dieselben sonst einfach zu Null aufheben würden; dieselben müssen vielmehr genau in der Art ihrer Wirkung unterschieden werden. „Die Zurückstossungskraft, vermittelst deren die Materie einen Raum erfüllt, ist eine blosse Flächenkraft, denn die einander berührenden Theile begrenzen einer den Wirkungsraum der anderen, und die repulsive Kraft kann keinen entfernteren Theil bewegen, ohne vermittelst der dazwischen liegenden. Dagegen eine Anziehungskraft, vermittelst deren eine Materie einen Raum einnimmt, ohne ihn zu erfüllen, dadurch sie also auf andere entferntere wirkt durch den leeren Raum, deren Wirkung setzt keine Materie, die dazwischen liegt, Grenzen. Also ist sie eine durchdringende Kraft, und dadurch allein jederzeit der Quantität der Materie proportionirt." „Von einer jeden Kraft (nun), die in verschiedene Weiten unmittelbar wirkt, und in Ansehung des Grades, womit sie auf einen jeden in gewisser Weite gegebenen Punkt bewegende Kraft ausübt, nur durch die Grösse des Raumes, in welchem sie sich ausbreiten muss, um auf jenen Punkt zu wirken, eingeschränkt wird, kann man sagen: dass sie in allen Räumen, in die sie sich verbreitet, so klein oder gross sie auch sein mögen, immer ein gleiches Quantum ausmache, dass aber der Grad ihrer Wirkung auf jenen Punkt in diesem Raume jederzeit im umgekehrten Verhältniss des Raumes stehe, in welchen sie sich hat verbreiten müssen, um auf ihn wirken zu können." „Also würde die ursprüngliche Anziehung der

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

Materie im umgekehrten Verhältniss der Quadrate der Entfernung durch alle Weiten, die ursprüngliche Zurückstossung in umgekehrtem Verhältniss der Würfel der unendlich kleinen Entfernungen wirken, und durch eine solche Wirkung und Gegenwirkung beider Grundkräfte würde Materie von einem bestimmten Grade der Erfüllung ihres Raumes möglich sein." Die Ableitungen dieser Wirkungsgesetze der primitiven Kräfte, vor allem die des zweiten, sind weniger klar und sicher als wohl wünschenswerth wäre. Kant wälzt auch die Verantwortung für dieselben im folgenden Satze ab: „Noch erkläre ich, dass ich nicht wolle, dass gegenwärtige Exposition des Gesetzes einer ursprünglichen Zurückstossung als zur Absicht meiner metaphysischen Behandlung der Materie nothwendig gehörig angesehen, noch die letztere (welcher es genug ist, die Erfüllung des Raumes als dynamische Eigenschaft derselben dargestellt zu haben) mit den Streitigkeiten und Zweifeln, welche die erste treffen könnten, bemengt werde."

In einer längeren Anmerkung zur Dynamik versucht dann Kant noch einen Schritt über die Anfangsgründe hinaus nach der eigentlichen Physik hin, um zu zeigen, wie sich nach seinem Begriff der Materie die Verschiedenheit der Stoffe erklären lasse. Wir gehen hierauf nicht ein, weil wir später auf das Thema wieder zurückkommen werden und merken nur die für Kant's Methode wichtige Stelle an. „Die repulsive Kraft muss am Aether, im Verhältniss auf die eigene Anziehungskraft desselben, ohne Vergleichung grösser gedacht werden, als an allen anderen uns bekannten Materien. Und das ist dann auch das Einzige, was wir bloss darum annehmen, weil es sich denken lässt. Denn ausser diesem darf weder irgend ein Gesetz der anziehenden noch zurückstossenden Kraft auf Muthmassungen a priori gewagt, sondern Alles, selbst die allgemeine Attraction, als Ursache der Schwere, muss sammt ihrem Gesetze aus Datis der Erfahrung geschlossen werden."

Die Dynamik ist der principiell wichtigste und schwierigste Theil der naturwissenschaftlichen Metaphysik; alles Uebrige folgt nun leicht. In der Mechanik wird die Materie erklärt als das „Bewegliche, sofern es, als ein solches, bewegende Kraft hat", und daraus die Sätze von der Constanz der Materie, das Gesetz der Trägheit und die Gleichheit der Action und Reaction abgeleitet.

Die Phänomenologie endlich erklärt die „Materie als das Bewegliche, sofern es, als ein solches, ein Gegenstand der Erfahrung sein kann" und zieht daraus die drei Sätze: „Die geradlinige Bewegung einer Materie in Ansehung eines empirischen Raumes ist, zum Unterschiede von der entgegengesetzten Bewegung des Raumes, ein bloss mögliches Prädikat." „Die Kreisbewegung einer Materie ist, zum Unterschiede von der entgegengesetzten Bewegung des Raumes, ein wirkliches Prädikat derselben; dagegen ist die entgegengesetzte

Bewegung eines relativen Raumes, statt der Bewegung des Körpers genommen, keine wirkliche Bewegung des letzteren, sondern, wenn sie dafür gehalten wird, ein blosser Schein.“ „In jeder Bewegung eines Körpers, wodurch er in Ansehung eines anderen bewegend ist, ist eine entgegengesetzte gleiche Bewegung des letzteren nothwendig.“

Kant's ganze Naturphilosophie ruht auf dem Satze: Materie als Gegenstand der Erfahrung ist nur möglich durch zwei Grundkräfte, nämlich eine Repulsivkraft, welche als Flächenkraft nur bei der Berührung oder auf unendlich kleine Entfernungen und nach dem umgekehrt cubischen Verhältniss dieser Entfernung wirkt und zweitens eine Attractivkraft, welche als eine durchdringende Kraft unmittelbar bis in unendliche Entfernungen nach dem umgekehrt quadratischen Verhältniss der letzteren wirkt. Der kritische Schluss von den Bedingungen der Möglichkeit der Erfahrung auf diese zwei Grundkräfte erscheint absolut sicher, sowie wir für die Materie eine Individualisation annehmen. Eine solche Individualisation nämlich ist nur denkbar, wenn die Materie die Kräfte hat, Fremdes von sich auszuschliessen und Eigenes zur Einheit zusammenzufassen. Da wir nun, wenn überhaupt ein physischer Körper und damit Physik selbst möglich sein soll, beides in der Materie annehmen müssen, so erscheint die Existenz der Kant'schen Grundkräfte im allgemeinsten Sinne so vollkommen sicher als die Erfahrung überhaupt. Dafür aber schwindet dann, je weiter Kant aus der Möglichkeit der Erfahrung der Materie die Wesenheit und Wirksamkeit der Kräfte erschliessen will, die Sicherheit des kritischen Apparates immer mehr und mehr.

Dass die Undurchdringlichkeit, die Repulsivkraft, eine Flächenkraft ist, lässt sich aus dem Princip der Individualisirung vielleicht ableiten, und wenn auch hier die Ableitung keineswegs kritisch sicher erscheint, so hat man doch gegen diese natürlichste Annahme nie Widerspruch erhoben. Dagegen ist das Wirkungsgesetz der Repulsion entschieden zweifelhaft. „Weil die nächsten Theile einer stetigen Materie einander berühren, sie mag nun weiter ausgedehnt oder zusammengedrückt sein, so denkt man sich ihre Entfernungen von einander als unendlich klein, und diesen unendlich kleinen Raum als im grösseren oder kleineren Grade von ihrer Zurückstossungskraft erfüllt. Der unendlich kleine Zwischenraum ist aber von der Berührung gar nicht unterschieden, also nur die Idee vom Raume, die dazu dient, um die Erweiterung einer Materie, als stetiger Grösse, anschaulich zu machen, ob sie zwar wirklich sogar nicht begriffen werden kann. Wenn es also heisst: die zurückstossenden Kräfte der einander unmittelbar treibenden Theile der Materie stehen in umgekehrtem Verhältnisse der Würfel ihrer Entfernungen, so bedeutet das nur: sie stehen in umgekehrtem Verhältnisse der körperlichen Räume, die man sich zwischen Theilen denkt, die einander dennoch unmittelbar berühren, und deren Entfernung eben

darum unendlich klein genannt werden muss, damit sie von aller wirklichen Entfernung unterschieden werde." Auf diese Weise vertheidigt Kant sein Gesetz, nach welchem die Repulsivkraft im indirect cubischen Verhältniss, weil sie eine Flächenkraft, die Attraction aber im indirect quadratischen Verhältniss wirkt, weil sie eine durchdringende Kraft ist. Er muss also, um überhaupt die Stärke der Repulsion von der Entfernung abhängig werden zu lassen, auch die Repulsion auf unendlich kleine Entfernungen, „die man sich denken kann", durchdringend machen, und trotzdem soll der Unterschied in der Wirkungsweise der beiden Kräfte bestehen bleiben. Ich halte das für das beste Zeichen, dass metaphysisch oder a priori über das Wirkungsgesetz der beiden Kräfte nichts auszumachen ist, und es scheint in der That der Kant'sche Schluss weniger durch die vorhergehenden Sätze als durch die Annahme bestimmt zu sein, dass die beiden Grundkräfte der Materie nicht nach demselben Verhältnisse wirken dürfen. Da nun für die Attraction das quadratische Verhältniss schon durch die Erfahrung gegeben scheint, so muss die Repulsion, die stärker mit der Entfernung abnimmt als die Attraction, nach dem cubischen Verhältniss wirken. Auch die Unterscheidung zwischen Repulsion und Attraction als einer Flächen- und einer durchdringenden Kraft erscheint durch jene Rücksicht geboten. Jedenfalls ist der quantitative Unterschied der beiden Kräfte ein schwach gestützter Punkt, und gegen das Zusammenfallen der beiden in eine Kraft, die wie im System des Boscowich mit der Entfernung auch der Art nach veränderlich ist, liesse sich höchstens einwenden, dass man bei einer Grundkraft der Materie eine Umwandlung in ihr Gegentheil erkenntnisstheoretisch unerlaubt finde.

Der schwächste Punkt jedoch ist die Artbestimmung der Attraction als Grundkraft der Materie. Kant nimmt die Ursache der Einheit in der Materie als eine Alles durchdringende, unmittelbare Fernwirkung, die nach dem umgekehrt quadratischen Verhältniss der Entfernung wirkt. Er hält die Erklärung des Zusammenhanges der Körper durch diese Kraft für die einzig mögliche. Zwar sieht er selbst die dabei entstehenden Schwierigkeiten. Er erklärt ausdrücklich die Repulsion für die primitive Kraft und erwähnt auch der Versuche, welche aus ihr allein die Materien construiren wollen; aber schliesslich findet er seine Attraction, wenn auch unbegreiflich, so doch nothwendig. Das scheint in der Metaphysik auch wirklich nicht anders möglich zu sein. Die alte, vielfach wieder auftauchende Ansicht, als erzeuge sich durch die Repulsion der Materie, die in die Grenzen der Welt eingeschlossen, ein Druck, der die einzelnen schwächer repulsiven Stoffe zu stärkerer Dichtigkeit zusammenballe, kann Kant hier nicht zulassen, da er die Antwort auf die Frage nach den Grenzen der Welt als ausserhalb einer kritischen Philosophie liegend bezeichnet. Eine Construction der Materie aus eigenthümlichen Bewegungszuständen in derselben

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

scheint näher zu liegen. Fast sollte man denken, die phoronomische Definition „Materie ist das Bewegliche im Raume" müsste dazu führen, die Materie durch ihr ursprünglich eingepflanzte Arten der Bewegung zu construiren [1]). Aber Kant will in seiner Metaphysik nicht bei den Bewegungen stehen bleiben, er will in der Dynamik die Kräfte aufsuchen, die Ursachen, welche jene Bewegungen erst hervorbringen.

Kant, so unabhängig als Philosoph, stand als Physiker in dem Anschauungskreise seiner Zeit. Der Repulsion lässt Kant ihre anschauliche Wirkungsweise als Flächenkraft und bemerkt ausdrücklich, dass fernwirkende Repulsionen, wie die expansive Elasticität der Luft [2]), nicht die ursprüngliche Repulsion, sondern erst abgeleitete Erscheinungen seien. Die Attraction aber wird, entsprechend der allgemeinen Vorstellung von der Gravitation, zu einer immer gleichen, Alles durchdringenden, unmittelbar in die Ferne wirkenden Urkraft. Trotzdem verbirgt er sich auch hier die Schwierigkeiten durchaus nicht. An einer Stelle bringt er den merkwürdigen Satz: „Warum aber gewisse Materien, ob sie gleich vielleicht nicht grössere, vielleicht wohl gar kleinere Kraft des Zusammenhanges haben, als andere flüssige, dennoch dem Verschieben ihrer Theile so mächtig widerstehen und daher nicht anders als durch Aufhebung des Zusammenhanges aller Theile in einer gegebenen Fläche zugleich sich trennen lassen, welches dann den Schein eines vorzüglichen Zusammenhanges giebt, wie also starre Körper möglich sind, das ist immer noch ein unaufgelöstes Problem, so leicht als auch die gemeine Naturlehre damit fertig zu werden glaubt"; und an den verschiedensten Stellen weist er immer wieder darauf hin, dass die Verschiedenheit der Materien nicht rein metaphysisch aus den Grundkräften construirt werden könne. So bleibt immer eine ziemliche Unklarheit, wie weit nun die Wechselwirkungen der Materie direct auf die Grundkräfte zurückgeführt, wie weit sie erst als vermittelte Wirkungen dieser betrachtet werden müssen, und auf welche Weise man zu einer Construction der verschiedenen Materien gelangen soll.

Kant will in seiner Metaphysik nur die Materie als solche kritisch prüfen, die Construction der specifischen Verschiedenheit der Arten weist er einem Grenzgebiet zu, das nicht mehr Metaphysik, aber auch noch nicht empirische Naturwissenschaft, sondern ein Mittelgebiet zwischen beiden sein soll.

---

[1]) Kant erwähnt in seiner Metaphysik Lesage an keiner Stelle, vielleicht hält er dessen System schon durch den Beweis der Unmöglichkeit der Atome für abgethan oder er meint, was ja von seinem Standpunkte aus auch richtig ist, dass zur Construction der Atome dieselben Bedingungen wie zur Construction der Materie gehören.

[2]) „So hat die Luft eine abgeleitete Elasticität vermittelst der Materie der Wärme, welche mit ihr innigst vereinigt ist, und deren Elasticität vielleicht ursprünglich ist."

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

Ueber dieses Grenzgebiet hat Kant selbst bei Lebzeiten kein Werk mehr veröffentlicht, aber ein hinterlassenes Manuscript beschäftigt sich auf das Eingehendste damit. Hier treten nun wirklich, was die Metaphysik noch nicht einmal ahnen liess, die primitiven Kräfte der Materie in den Hintergrund und die Construction der letzteren erfolgt aus inneren Bewegungen derselben, die allerdings von jenen Grundkräften zuerst hervorgerufen werden. In Kant's Nachlass fanden sich auf etwa 100 Foliobogen Materialien zu einem Werk, welches den Titel führen sollte „Vom Uebergang von den metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft zur Physik". Es sind die Anfangspartien des Werkes in mehrfacher Bearbeitung und Umarbeitung, deren Studium wegen des mangelnden Zusammenhanges, der vielfachen Formen, in denen die einzelnen Bearbeitungen wiederholt werden, und auch wegen der Einmischung heterogener Dinge ein sehr schweres und auf alle Fälle sehr zeitraubendes ist. Dies mögen die Ursachen gewesen sein, dass trotz einiger Versuche zu einer ordnenden und sichtenden Redaction des Werkes dasselbe doch erst in neuester Zeit, und auch dann noch nicht geordnet und bearbeitet, sondern nur in seinem ursprünglichen Zustande (von Auslassungen abgesehen), als Manuscript veröffentlicht worden ist [1]).

Es liegt in der Natur der Sache, dass auch ich eine Darstellung des Werkes nicht versuche. Ich will nur kurz die Stellen desselben berühren, die sich rein auf die Naturwissenschaften beziehen und nur in so weit, als sie die metaphysischen Grundkräfte der Materie mit den phänomenalen, mit den eigentlich physischen Kräften zu verbinden suchen.

Die metaphysischen Anfangsgründe der Naturwissenschaft hatten es nur mit der Constitution der Materie zu thun, sie gaben nur die ersten Bedingungen, die primitiven Kräfte, unter deren Annahme allein die Materie ein Object unserer Erfahrung werden kann. Diese „primitiven Kräfte sind Anziehung und Abstossung, welche (und zwar beide vereinigt) den Weltraum sowohl einnehmen (durch Anziehung) als auch erfüllen (durch Abstossung), ohne welche also gar keine Materie existiren würde [2])." Diese Kräfte aber, als Bedingung der Möglichkeit der Erfahrung, sind nicht selbst erfahrbar, sie gehören darum in das Gebiet der Philosophie, nicht in das der Physik. Die letztere hat es nur zu thun mit den Kräften, deren Wirkungen als Bewegung wirklich in Erscheinung treten, also mit den bewegenden Kräften der Materie. „In der Physik nun suchen wir die bewegenden Kräfte der Materie auf, welche die Ursachen der Erscheinungen sind, die die Natur dar-

---

[1]) Bis jetzt sind in der „Altpreussischen Monatsschrift" (Bd. XIX, XX, XI) von den vorhandenen 12 Convoluten nur das 1. bis 3., 5., 7. und 9. bis 12. erschienen; die übrigen sind in Aussicht gestellt. Das Manuscript selbst befindet sich im Besitze des Herrn Dr. Albrecht Krause in Hamburg.

[2]) Altpreuss. Monatsschr. XX, p. 471.

bietet [1])." „Physik ist also Erfahrungslehre (durch Observation und Experiment) von den bewegenden Kräften der Materie. Da aber Erfahrung (äussere sowohl als innere) als ein subjectives System der Wahrnehmungen jederzeit Eine ist, so werden die den Sinn des Subjects afficirenden bewegenden Kräfte im Raum schon vermöge ihrer Coexistenz in demselben in allen Stellen desselben bewegend sein (denn ein leerer Raum ist kein Gegenstand möglicher Erfahrung), so werden die Theile der Materie als bewegliche und bewegende Substanzen nicht unter dem Namen von Materien (denn Materie ist die allverbreitete Einheit des Beweglichen), sondern unter dem der Stoffe, woraus die Materie besteht, gedacht werden müssen, deren es viele und vielerlei geben kann, die zwar darin übereinkommen, dass sie im äusseren Verhältniss durch Anziehung und Abstossung bewegend sind, in der Art aber, wie sie die Zusammensetzung und Trennung der Materie modificiren, specifisch verschiedene körperbildende bewegende Kräfte abgeben, deren jede als Grundlage (Basis) dieser Kräfte die wirkende Ursache jener Verhältnisse ist und von den Phänomenen ihrer Wirkung den Namen (des Sauerstoffs, des Kohlenstoffs, Wasserstoffs, Stickstoffs u. s. w.) führt [2])." Der bewegenden Kräfte der Stoffe aber giebt es zweierlei, die mechanisch bewegenden und die dynamisch bewegenden Kräfte. „Die bewegenden Kräfte sind entweder mechanisch als Körper, oder dynamisch als blosse Materie (Stoff) zu gebildeten Körpern beweglich und bewegend. Die ersteren sind ortsverändernd (vis locomotiva), die letzteren innerhalb des Raumes, den die Materie einnimmt, (vis interne motiva) in ihren Theilen einander bewegend . . . Mechanisch bewegende Kräfte sind diejenigen, durch welche die Materie ihre eigene Bewegung bloss einer anderen mittheilt, dynamisch bewegende sind die, durch welche sie die Bewegung unmittelbar einer anderen ertheilt [3])." „Die mechanisch bewegenden Kräfte setzen die dynamisch und ursprünglich bewegenden voraus [4])."

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

Mit diesen dynamisch bewegenden Kräften hat es nun, weil die mechanischen Kräfte nur abgeleitete sind, der Uebergang von der Metaphysik zur Physik einzig zu thun.

Da der Raum eine Form unserer Anschauung ist, die nur auf ein Datum unserer Sinnlichkeit angewandt werden kann, so ist der leere Raum ohne Erfüllung durch Materie absolut nicht erfahrbar. „Der leere Raum ist kein Object möglicher Erfahrung. Wenn er das letzte ist, so ist er von Materie eingenommen und zwar in allen seinen Theilen [5])." Da ferner nur Ein Raum und Eine Erfahrung existirt, so muss auch der ganze Raum von einem continuir-

[1]) Altpreuss. Monatsschrift, XXI, p. 82.
[2]) Ibid. XX, p. 431.
[3]) Ibid. XIX, p. 80.
[4]) Ibid. XXI, p. 87
[5]) Ibid. XX, p. 109.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

lichen, einheitlichen und gleichartigen Stoff erfüllt sein, der unserer Raumesanschauung als Grundlage dient. Dieser Stoff kann, wie alle Materie, nur Object unserer Sinne werden, wenn er beweglich und bewegend in allen Theilen stetig bewegt ist. Diese Bewegung aber darf man nicht als eine mechanische denken, sonst bedürfte der Stoff wieder eines andern, der seine Bewegung anhöbe. Die Bewegung kann auch keinen zeitlichen Anfang haben, denn dann müsste man der Materie eine Spontaneität zuschreiben, die ihrem Begriff widerspricht. Jener Stoff, der den ganzen Weltenraum erfüllt, muss von aller Ewigkeit her, sich agitirend, durch sich selbst bewegend sein, so dass seine Bewegung nicht ortsverändernd, sondern nur innere, stetige, weder zu vermehrende noch zu vermindernde Bewegung ist. Diesen Stoff, der die Bedingung zur Möglichkeit der Physik bildet, nennt Kant Wärmestoff, ohne aber an das Gefühl der Wärme erinnern zu wollen, oder auch Aether. „Es ist eine im ganzen Weltraum als ein Continuum verbreitete, alle Körper gleichförmig durchdringend erfüllende (mithin keiner Ortsveränderung unterworfene) Materie, welche, man mag sie nun Aether oder Wärmestoff etc. nennen, kein hypothetischer Stoff ist . . ., sondern als zum Uebergange von den metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft zur Physik nothwendig gehörendes Stück a priori erkannt und postulirt werden kann [1]." Die Basis des Ganzen der Vereinigung aller bewegenden Kräfte der Materie ist der Wärmestoff (gleichsam der hypostasirte Raum selbst, in dem sich alles bewegt), das Princip der Möglichkeit der Einheit des Ganzen möglicher Erfahrung. Wärmestoff ist der perceptible Raum von allen anderen Eigenschaften entblösst . . .; da im Raum Alles ortbewegbar ist, nur der Raum selbst nicht, da kein leerer Raum Gegenstand der Erfahrung ist, so ist jene Materie durch das ganze Weltgebäude ausgebreitet, und ihre Existenz nothwendig, nämlich relativ auf Gegenstände der Sinne [2]."

Ein grosser Theil des Manuscripts, von dem wir reden, ist mit den Beweisen für die Realität des Aethers ausgefüllt; meist folgen dieselben dem eben eingehaltenen Gange, doch finden sich auch abweichende. Ich will nur noch einen derselben geben, der wenigstens in etwas an die Kant'sche Hypothese der Weltbildung erinnert. „Das Object der Naturwissenschaft ist entweder Materie überhaupt (formlos) oder Körper, eine durch ihre innerlich und äusserlich bewegenden Kräfte sich

---

[1]) Altpreussische Monatsschrift XX, p. 102. Der Sicherheit Kant's in Betreff des Aethers stellt sich diejenige Tyndall's zur Seite, wenn sie auch bei beiden Männern auf ganz verschiedenem Grunde ruht. Tyndall sagt in seinen Fragmenten aus den Naturwissenschaften (Deutsche Ausgabe, Braunschweig 1874, S. 4): „Die meisten Naturforscher sind von seiner (des Aethers) Existenz so fest überzeugt, als von der der Sonne und des Mondes."

[2]) Altpreussische Monatsschrift XX, p. 106 bis 107.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

selbst der Textur und Figur nach beschränkende und aller Veränderung an derselben widerstehende Materie, welche dann ein physischer Körper genannt wird [1]." Der Satz aber, es giebt physische Körper, setzt den Satz voraus, es giebt Materie, deren bewegende Kräfte und Bewegung der Erzeugung eines Körpers in der Zeit vorangehen. „Diese Bildung (von Körpern) aber, die von der Materie selbst geschehen soll, muss einen ersten Anfang haben, davon zwar die Möglichkeit unbegreiflich, die Ursprünglichkeit aber als Selbstthätigkeit nicht zu bezweifeln ist [2]." Es muss also eine Materie geben, die allein ursprünglich bewegende Kraft hat, die die Welt überall erfüllt und die alle anderen bewegenden Kräfte an allen Orten in Wirksamkeit erhält. Diese materia primitiae movens, der Aether oder Wärmestoff „kann nicht fest, oder flüssig, nicht coërcibel, sondern nur durch ihre eigene Attraction und Repulsion (die metaphysischen Kräfte) beständig bewegend sein [3]". Da dem Aether keine ortsverändernden Bewegungen eigen sind, so kann er nur in sich Schwingungen machen, die eben durch seine primitiven Kräfte erzeugt bis in alle Ewigkeit fortdauern [4]. Wie der Aether selbst, so sind seine Bewegungen in der ganzen Welt gleichmässig, überall die Quelle der bewegenden Kräfte und überall diese wieder in sich zurücknehmend. Nachdem Kant so die Materie mit ihren bewegenden Kräften constituirt, geht er nun dazu über, die Eigenschaften derselben nach den vier Categorien der Quantität, Qualität, Relation und Modalität in grösster Vollständigkeit zu untersuchen.

„Wäre alle den Raum erfüllende Materie gleichartig, so würde die Quantität derselben, in gleichen Räumen gleich vertheilt, allenfalls geometrisch, durch die Raumesgrössen (volumina), gemessen werden können [5]." Nun aber dieses nicht der Fall ist, so muss es ein dynamisches Mittel geben, welches die Menge der Materie durch ihre Bewegungsmenge misst. Diese Maschine ist die Wage. Alle Materie ist also ihrem Begriffe nach wägbar oder ponderabel, weil sonst ihre Quantität absolut unbestimmbar wäre. „Eine absolut imponderable Materie ist ein Widerspruch mit sich selbst; denn sie wäre eine bewegende Kraft ohne alle Quantität derselben. Dabei aber lässt

---

[1]) Altpreuss. Monatsschr. XX, p. 100.

[2]) Ibid.; ibid.

[3]) Ibid. XX, p. 107.

[4]) Merkwürdig klingen einige Sätze aus Kant's Doctordissertation De Igne (vom 17. April 1755) an seine letzte Arbeit an. In jener heisst es: „Lehrsatz VII. Der Stoff des Feuers ist ein elastischer Stoff, welcher die Elemente eines Körpers, mit dem er vermengt ist, zusammenhält; seine wellenförmige oder zitternde Bewegung ist das, was man Wärme nennt." „Lehrsatz VIII. Der Wärmestoff ist nichts anderes als der Aether (der Lichtstoff), welcher durch die starke Anziehung der Körper in den Zwischenräumen zusammengepresst ist." (Uebersetzung von Kirchmann).

[5]) Altpreuss. Monatsschr. XIX, p. 81.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

sich gar wohl eine relativ oder bedingt imponderable Materie denken, für welche keine Wage möglich sein würde, wenn nämlich diese Materie incoërcibel wäre[1])." Eine solche relativ imponderable Materie, die einzig mögliche, ist der Aether, der, weil er in jedem Raumtheile vorhanden, auch absolut incoërcibel oder absolut unsperrbar sein muss und somit durch keine Wage aufgehalten und bestimmt werden kann. Oder der Aether ist unwägbar, weil er als eine im unendlichen Raume überall gleich verbreitete, nicht bloss alle Körper umgebende, sondern auch innigst durchdringende Materie vorgestellt wird, die freilich nirgend hinfallen oder wiegen kann.

„Die erste Eintheilung der Materie in Ansehung ihrer Qualität kann nur die sein: sie ist entweder flüssig oder fest, welche letztere Beschaffenheit man mit Eulern besser durch starre (materia rigida) ausdrückt[2])." „Eine Materie heisst flüssig, die nur durch stetig auf einander folgende Stösse einer unendlich getheilten Grösse auf eine ruhige Fläche eines Körpers bewegend ist. Umgekehrt ist ein Körper, dessen Fläche als unbeweglich jenem Stosse widersteht, fest[3])." „Das Tropfbarflüssige ist eine ponderable, sich durch innere Anziehung im umgebenden Raume in Kugelform bildende (zur kleinsten Oberfläche strebende flüssige) Materie: das Elastischflüssige (z. B. Luft und Dampf) kann in das Permanent- und Transitorischflüssige eingetheilt werden, von dem die erstere Species den Namen der Gasarten führt[4])." Aller Zusammenhang aber des Tropfbarflüssigen wie des Festen kann nur durch die bewegenden Kräfte des Aethers erklärt werden. „Die Anziehung in der Berührung bringt keine Bewegung hervor, denn die Materie widersteht den angezogenen Körpertheilchen in der Richtung der Berührung eben so viel, als dieses von jener angezogen würde. Also würde das Wasser, Quecksilber etc. keinen Tropfen aus eigenen Kräften bilden. Es kann dieses auch nicht durch den Druck, mithin von keiner todten Kraft geschehen, sondern nur durch den Stoss, der nicht den Wasserkörper im Ganzen nach einer bestimmten Richtung, sondern in allen seinen Theilen nach allen Richtungen unaufhörlich durch Pulsus bewegt. Auf diese Art aber lässt sich begreifen, dass das Flüssige allen diesen Stössen so lange weichen müsse, bis die Berührung der Theile untereinander die grösste, und die mit dem leeren Raume die kleinste ist," d. h. bis der Wassertropfen Kugelgestalt angenommen hat[5]). „Es ist also bloss der continuirlich im zitternden und erschütternden Zustande alle

[1]) Altpreuss. Monatsschr. XIX, p. 82.
[2]) Ibid. XX, p. 350.
[3]) Ibid. XIX, p. 84.
[4]) Ibid. XIX, p. 85.
[5]) Ibid. XXI, p. 100. Vergl. XX, p. 553.

Materie durchdringende Wärmestoff, also eine lebendige Kraft der Materie die Ursache der Phänomene der tropfbaren Flüssigkeit als einer solchen [1]." Aber auch der Zusammenhang der starren Körper wird durch die bewegenden Kräfte des Wärmestoffes bedingt. „Man kann aber den Zusammenhang sich auf zweierlei Art bewirkt denken, nämlich entweder als oberflächliche, oder als durchdringende Anziehung, doch beide in der Berührung (damit man sie nicht mit der Gravitationsanziehung vermenge) und durch stetige alldurchdringende Agitation des Wärmestoffs bewirkt, aber zugleich für die ponderable Materie von allerlei Arten und Graden als Potenzen modificirt [2]." Die Cohäsibilität eines Stoffes kann gemessen werden durch die Länge eines Prisma, welches durch sein eigenes Gewicht zerreisst. Da aber dieses Prisma in unendlich dünne Lamellen gespalten gedacht werden kann und alle diese Lamellen durch ihren Zusammenhang das Prisma tragen müssen, so kann dieser Zusammenhang nicht seine Ursache nur in jeder Lamelle haben, diese Ursache muss vielmehr eine durchdringende, die lebendige Kraft einer durchdringenden Materie sein. „Die Cohäsion des Ponderablen wird durch das Incohäsible und Imponderable bewirkt [3]." „Die Cohäsion enthält ein Moment von endlicher Geschwindigkeit, welches aber nicht accelerirend ist, weil es bei seiner Anziehung zugleich Abstossung als wirkliche Bewegung der Vibration und continuirlich wechselnde Gegenstösse, mithin lebendige Kraft enthält. Diese bewegende Kraft ist Wärmestoff, denn alles Feste ist doch aus dem Flüssigen entstanden, also aus Gegenstössen, die zuletzt gleichförmig innerlich bewegend sind [4]."

So erklärt nun Kant durch den Wärmestoff oder Aether noch weiter den Uebergang des Festen in Flüssiges und umgekehrt, die Anziehung des Festen und Flüssigen unter einander, wie die Capillarerscheinungen und einiges andere, welche er unter dem Abschnitte Relation der bewegenden Kräfte der Materie abhandelt. Von der Untersuchung über die Modalität der bewegenden Kräfte der Materie ist kaum mehr als die Ueberschrift vorhanden. Merkwürdiger Weise lässt Kant auch bei der Untersuchung der bewegenden Kräfte der Materie das Verhältniss der Schwerkraft zu den primitiven Kräften fast ausser Beachtung. Wenn aber im Wärmestoff oder Aether eine allverbreitete, alldurchdringende und allbewegende (man kann, was die Zeit betrifft, noch hinzusetzen: alle Bewegung zuerst anhebende) Materie, welche den Weltenraum erfüllt, gesehen wird, so muss auch die Schwerkraft auf diesen Aether zurückgeführt und der Zusammenhang mit seinen primitiven Kräften näher angegeben werden. Kant deutet auch einmal etwas dergleichen an:

---

[1]) Altpreuss. Monatsschr. XXI, p. 89.
[2]) Ibid. XXI, p. 153.
[3]) Ibid. XIX, p. 93.
[4]) Ibid. XIX, p. 94.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

„So gehört z. B. die Lehre von einer Anziehung in die Ferne überhaupt und ihrer Grösse im umgekehrten Verhältniss des Quadrates der Entfernungen, wie man sich diese Begriffe a priori denken kann, zu den metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft; die von der Schwere, so wie sie und ihr Gesetz in verschiedenen Höhen beobachtet wird, in die Physik; beide aber erfordern doch in einer Naturphilosophie eine Verbindung [1].“ Aber wo er, was nicht oft geschieht, auf die Schwere oder Gravitation zu sprechen kommt, da übergeht er jenes Problem und macht sich nur den Beweis zur Aufgabe [2]), dass überall im Raum Materie vorhanden sein muss, in der nicht bloss attractive, sondern auch repulsive Kräfte angenommen werden müssen. Kant hatte für sein Werk zwei Theile vorgesehen, dem Elementarsystem der bewegenden Kräfte der Materie sollte das Weltsystem folgen; vielleicht, ja wahrscheinlich beabsichtigte er in dem letzteren Theile auf die bewegenden Kräfte zwischen Himmelskörpern näher einzugehen.

Für Kant war die Abfassung des beabsichtigten Werkes eine Nothwendigkeit. Da für ihn der Raum nur eine Form unserer Anschauung, so war für ihn nur der mit Materie erfüllte Raum existent. Diese vollkommene Raumerfüllung hatten die metaphysischen Anfangsgründe durch die primitiven Kräfte der Materie constituirt. Aber damit war die Materie für uns noch kein Erfahrungsgegenstand, sie wird dies erst, wenn sie unsere Sinne afficiren kann. Und da dies nur durch Bewegung möglich ist, so muss überall im Raume die Materie in immerwährender Bewegung begriffen sein. Aus diesem Grunde ist der Aether für das ganze System der Kant'schen Philosophie eine absolut nothwendige, unerlässliche Construction und keineswegs eine müssige Speculation eines altersschwachen Greises. Nur von diesem Gesichtspunkte aus ist die grosse Arbeit zu begreifen, die Kant während der letzten Jahre seines Lebens dieser Aufgabe widmete, und welche Wichtigkeit er selbst derselben beilegte, geht aus einem Briefe hervor, den er am 21. September 1798 an Garve richtete. Er beklagt darin sein schmerzliches Loos, durch das ihm bestimmt sei, „den völligen Abschluss seiner Rechnung in Sachen, welche das Ganze der Philosophie betreffen, vor sich liegen und es noch immer nicht vollendet zu sehen“; er nennt es einen „Tantalischen Schmerz, der indessen doch nicht hoffnungslos ist“. Specieller fährt er dann fort: „Die Aufgabe, mit der ich mich jetzt beschäftige, betrifft den „„Uebergang von den metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft““. Sie will aufgelöst sein, weil sonst im System der kritischen Philosophie eine Lücke sein würde. Die Ansprüche der Vernunft darauf lassen nicht nach: Das Bewusstsein des Vermögens dazu gleichfalls nicht; aber die Befriedigung derselben wird,

[1]) Altpreuss. Monatsschr. XX, p. 548.

[2]) Ibid. XIX, p. 593 bis 607.

wenngleich nicht durch völlige Lähmung der Lebenskraft, doch durch immer sich einstellende Hemmungen derselben bis zur höchsten Ungeduld aufgeschoben [1]."

Naturphilosophie. c. 1780 bis c. 1820.

In der That hat Kant mit seinem letzten Werke von den metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaften her der Physik einen bedeutenden Schritt entgegen gethan. Deluc's substance purement grave und fluide déférent waren mit Kant's ponderabler Materie und Aether nahe verwandt, und Kant erwähnt auch Deluc an mehreren Stellen seines Werkes. Mit Lesage, den er auch hier nirgends nennt, stimmt er darin überein, dass er alle bewegenden Kräfte der imponderablen Materie zueignet und von dieser alle Bewegungen anheben lässt. Der principielle Unterschied in den beiden Annahmen besteht nur darin, dass Lesage seinem Aether nur mechanische Kräfte, nur geradlinig gleichförmige Bewegungen zuschreibt, während Kant seinem imponderablen Stoff auch Bewegung ursprünglich erzeugende dynamische Kräfte und nur innere vibrirende Bewegungen zuerkennt. Auch mit einem nicht zu starren Atomistiker könnte man auf dem Boden der Kant'schen Anschauung noch zusammenkommen, wenn er nur nicht an einem absolut leeren Raume und einer absoluten Untheilbarkeit der Atome festhielte, sondern sich mit Räumen leer von ponderabler Materie und factisch unzertheilten kleinsten Theilen der ponderablen Materie begnügte. Jedenfalls hat Kant seiner Zeit voraus die Vorstellung von der inneren Bewegung aller Materie wieder zuerst hervorgehoben. Und wenn er betont, dass die Materie nur als beweglich, bewegend und bewegt ein Gegenstand der Erfahrung werden könne, dass danach alle Materie nur als in immerwährender innerer Bewegung begriffen vorgestellt werden könne, so hat er sich ganz in den Ideenkreis hineingefunden, der in der Physik erst nach der Ausbildung der neueren Wärmetheorie und der mechanischen Gastheorie zur Anerkennung aber danach auch zu immer weiterer Herrschaft gekommen ist. Materie ist nur als das ewig Bewegte zu begreifen und zu erklären, alle Materie, feste, flüssige wie luftförmige ist in immerwährender innerer Bewegung begriffen. Dieser werthvollste Kern des nachgelassenen Werkes von Kant, der von den Ergebnissen der neueren Physik immer mehr gefordert und bestätigt wird, und von dem die metaphysischen Anfangsgründe der Naturwissenschaft noch so weit entfernt zu sein schienen, dieser Kern zeugt nicht nur für die Wichtigkeit des hinterlassenen Werkes, sondern auch für die Güte des ganzen kritischen Systems, wenigstens soweit dasselbe noch ganz auf seinem erkenntnisstheoretischen Gebiete bleibt.

Dass Kant bei der Weiterführung seiner Untersuchungen Schwierigkeiten findet, dass er in der Ableitung aller bewegenden Kräfte der

---

[1] Altpreuss. Monatsschr. XX, p. 342.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

Materie aus seinem Aether nicht weiter vorwärts kommt, davon liegt die Ursache wohl nicht allein in seinem Alter. Mag dieses an den vielen oft wenig von einander abweichenden Versuchen Schuld gewesen sein, mag es ihn auch wirklich an einem weiteren Vordringen in gewissem Grade gehindert haben, die vollständige Lösung des Problems, meine ich, wäre ihm auch in seiner vollständigen Kraft nicht gelungen. Der Uebergang von der Metaphysik zur Physik ist nicht das Problem eines einzelnen Mannes, sondern eine Aufgabe beider Wissenschaften, deren Lösung dieselben sich immer mehr annähern, die sie aber wohl niemals erreichen werden. Der Physiker wird immer nach dem jeweiligen Stande seiner Kenntnisse sich Hypothesen über die Constitution der Materie bilden, unbekümmert darum, ob dieselben das innerste Wesen derselben ausdrücken. Der Philosoph aber wird sich immer die Materie so construiren, dass dieselbe den Anforderungen der Erkenntnisstheorie genügt, ohne darauf zu sehen, ob sich aus seiner Construction auch alle physikalischen Eigenschaften derselben ableiten lassen. Die Kluft zwischen den beiden Constructionen wird wohl immer mehr verringert, aber doch nicht ganz ausgefüllt werden. Genug, wenn Philosophen und Physiker so viel Kenntniss und so viel Achtung ihrer gegenseitigen Wissenschaften haben, dass ihre Constructionen sich nicht direct widersprechen und ausschliessen, wenn nicht Philosophen wie Physiker jede ihre Constructionen als vollständige und ausschliesslich berechtigte Lösungen der Aufgabe, wenn sie sie nur ansehen als Material, als Etappen zu dem erstrebten gemeinsamen Ziele. Dass aber beide Wissenschaften nicht dazu bestimmt sind, sich ewig zu widersprechen, sondern vielmehr wohl geeignet einander entgegenkommend sich immer mehr zu nähern, dafür giebt das nachgelassene Werk Kant's einen vollgültigen Beweis.

Hierin liegt der Werth dieses Werkes für die Physik, denn einen Einfluss auf diese Wissenschaft oder ihre Bearbeiter konnte ja dasselbe nicht haben, da es bis heute wohl kaum den Physikern mehr als dem Namen nach bekannt geworden ist. Auf Kant selbst und sein Verhältniss zur Physik wirft das Werk jedenfalls ein neues Licht, und darum durfte ich hier dasselbe nicht unerwähnt lassen [1]).

Fürderhin aber müssen wir dasselbe wieder aus unserm Gedächtniss streichen und zu den metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaften zurückkehren, um zu sehen, welchen Einfluss diese wenigstens zu ihrer Zeit ausgeübt haben. Sie fanden zuerst auch unter den Physikern eine schnelle Verbreitung und unter dem frischen Eindruck der Kritik der reinen Vernunft eine begeisterte und fast widerspruchsfreie Aufnahme. Der Heidelberger Professor Muncke [2]) sagt im Jahre 1831 ganz bezeichnend: „Kant's philosophisches System fand so über-

[1]) Der Abschnitt über das nachgelassene Werk Kant's ist schon gedruckt in dem „Berichte d. Fr. Deutsch. Hochstifts für 1885/86", S. 304 bis 316.

[2]) Gehler's physik. Wörterb. 2. Aufl., VI, p. 1419.

mässigen Beifall, dass seine Zeitgenossen eine Prüfung des Einzelnen für überflüssig hielten und vielmehr das Ganze als höchst vollendet betrachteten. Der von ihm aufgestellte Begriff der Materie blieb in den Grenzen der Speculation, es liess sich auf keine Weise darthun, dass die beiden hypothetisch angenommenen Kräfte der Materie nicht zukommen, und da die alte Atomistik unlängst als unhaltbar aufgegeben war, so liessen es sich auch unter den Physikern die Anhänger Newton's gefallen, dass man der sogenannten dynamischen Naturlehre den Vorzug gab. Es ist daher nicht leicht, die vorzüglichsten unter denen namhaft zu machen, welche sich zu dem neuen Systeme in seiner ursprünglichen Reinheit bekannten, doch glaube ich, dass J. C. Fischer [1]) und J. F. Fries als solche zu nennen sind. Inzwischen schoben die meisten dem gefeierten Philosophen etwas ganz anderes unter, als er wirklich gesagt hatte." Doch war immer der Enthusiasmus weniger allgemein, als es den Anschein hatte; die meisten Physiker verschwiegen nur in der ersten Zeit ihre abweichende Meinung, und als erst der Enthusiasmus sich gekühlt hatte, zeigte sich, wie wenig in Wirklichkeit Bekehrte unter ihnen zu finden waren. Am ersten zeigte sich das durch die nur einige Zeit erschütterte, aber direct wieder befestigte Herrschaft der Atomistik. Die neuen chemischen Entdeckungen, die bald erkannten festen Verhältnisse der chemischen Verbindungen, die so leicht durch die Atomistik und so schwer durch die dynamische Philosophie zu erklären waren, überhaupt das Ganze sich nach und nach auf der Atomistik so stolz aufbauende chemische Lehrgebäude, auch vielleicht die neuen Entdeckungen in der Wärmetheorie, alles drängte als zu seiner einfachsten Erklärung zur Atomistik, und Kant's kritische Beweise von der Unmöglichkeit des leeren Raumes und der Atome machten so wenige in der Annahme der letzteren irre, als sie sich auf der anderen Seite Anhänger der dynamischen Raumerfüllung der Materie gewinnen konnten. Besser erging es den Grundkräften der Materie. Anziehende Kräfte brauchte man zur Constitution des Weltalls seit Newton; repulsive Kräfte schrieb man zur Erklärung der Ausdehnung der Körper dem Wärmestoff zu; an den magnetischen und den elektrischen Flüssigkeiten aber hatte man sogar Beispiele für eine Coexistenz der beiden Kräfte. So war durchaus keine Ursache zu bemerken, warum man dem grossen Philosophen auch auf diesem Gebiete Opposition machen sollte. Doch wurde auch hier die Abhängigkeit der Physik von der Philosophie nur eine scheinbare. Die Eigenschaften der allgemeinen Attraction hatte Kant von Newton aufgenommen; diese behielt man bei, nahm aber diese Attraction als Grundkraft in den Atomen an und erklärte durch sie

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

---

[1]) Fischer giebt in seiner Geschichte der Physik (VI, p. 15 bis 115) einen ausführlichen Auszug aus den metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft und bekennt sich voll und ohne Rückhalt zu Kant's Ansichten.

direct die Gravitation. Ueber das Verhältniss der letzteren zur Cohäsion und Adhäsion blieben die Meinungen noch ganz getheilt, und jeder Physiker machte sich hierfür eine Privathypothese zurecht, so wie sie ihm gerade für seine Untersuchungen passte. Die Repulsivkraft Kant's als Grundkraft aber kümmerte die Physiker wenig. Im Grunde blieb man hier bei der absoluten Undurchdringlichkeit der Atome, und darüber, ob man die Repulsivkraft der elastischen Körper, der Wärme etc. als Flächenkraft und proportional dem cubischen Verhältniss der Entfernung fassen solle, darüber sprach man sich kaum aus, man war zufrieden mit der Behauptung, sie nehme mit der Entfernung stärker ab als die Anziehung.

Die philosophischen Nachfolger Kant's waren auch nicht geeignet, mehr als der Meister der Philosophie unter den Physikern Anhänger zu erwerben. Schelling zwar stand wenigstens im Anfange seiner Laufbahn auf gemeinsamem Boden mit den Naturwissenschaften und war bemüht, der Erfahrung in seiner Philosophie ihr Recht zu geben. Seine ersten Schriften[1]) sind, wenn man sich bemüht, die bilderreiche Sprache in die technischen Ausdrücke der Naturwissenschaften zu übersetzen, für den Physiker anregend und nach manchen Richtungen hin interessant. Sie lassen deutlich die Absicht erkennen, die Naturphilosophie Kant's durch die Ergebnisse der neueren Physik, die Entdeckung des Galvanismus und seiner mannigfaltigen Wirkungen, weiter zu entwickeln.

Die Natur ist nach Schelling der Inbegriff alles Seins. Da Sein aber absolute Thätigkeit ist, so kann auch die Natur nur als absolute Thätigkeit gefasst werden. Eine absolute Thätigkeit erzeugt indessen für sich nur ein unendliches Product; sollen endliche Producte zu Stande kommen, so muss die Thätigkeit der Natur gehemmt werden. Die Hemmung kann selbst wieder nur eine Thätigkeit der Natur, und zwar eine der ersten entgegengesetzte sein. Also besteht die Natur durch zwei einander entgegengesetzt gerichtete Kräfte, einer accelerirenden und einer retardirenden oder einer expandirenden und einer contrahirenden. Die Einheit dieser beiden Kräfte ist die Materie[2]). In den verschie-

---

[1]) Ideen zu einer Philosophie der Natur, Leipzig 1797. Von der Weltseele, Hamburg 1798 (der dritten Auflage von 1809 ist die Abhandlung beigefügt „Ueber das Verhältniss des Realen und des Idealen in der Natur oder Entwickelung der ersten Grundsätze der Naturphilosophie an den Principien der Schwere und des Lichts"). Erster Entwurf eines Systems der Naturphilosophie, Jena und Leipzig 1799. System des transscendentalen Idealismus, Tübingen 1800. Abhandlungen in der „Zeitschrift für speculative Physik", Jena und Leipzig 1800 bis 1801, zwei Bände. (Darin u. A. „Allgemeine Deduction des dynamischen Processes oder der Kategorien der Physik", Bd. I, 1800).

[2]) Erster Entw. e. Syst. d. Naturph.; Sämmtl. Werke, Stuttgart u. Augsb. 1858, III, p. 12 bis 30. System des transsc. Id.; Sämmtl. Werke, III, p. 440

denen Materien sind die verschiedenen entgegengesetzten Kräfte in verschiedenen Verhältnissen vorhanden. Diejenige, in welcher die Kräfte am meisten ins Gleichgewicht gesetzt sind, ist die flüssigste Materie (das scheint der Wärmestoff zu sein) [1]; diejenige Materie, in welcher nur die retardirende Kraft vorhanden wäre, würde absolut starr sein; eine solche kann es aber eben so wenig als eine absolut expansible geben. Die repulsive wie die attractive Thätigkeit müssen sich gegenseitig an einander erschöpfen, es kann also keine Materie ausser ihrer Sphäre noch eine Anziehungskraft ausüben [2]. Wo zwei Körper in der Entfernung aufeinander wirken, da kann das nur durch ihre Beziehung auf ein Drittes geschehen. Dieses Dritte ist bei allen Körpern des Sonnensystems die Sonne, die Beziehungen der ersteren zur letzteren werden durch das Licht ermittelt [3]. In seinen ersten Schriften betont Schelling hierbei vor Allem die chemischen Wirkungen des Lichts, später aber benutzt er dasselbe viel fundamentaler zur Verbindung des Idealen und Realen, des Subjectiven und Objectiven. Das Licht ist nicht Materie, sondern erste ideelle Thätigkeit der Materie. Das Licht beschreibt alle Dimensionen des Raumes, aber es erfüllt ihn nicht, das Licht ist nicht raumerfüllende Thätigkeit selbst, sondern es ist das Construiren der Raumerfüllung. Was aber ein Construirendes ist, das ist ein Begreifendes. Somit ist das Licht als das Construirende der Raumerfüllung, dessen Begreifendes oder Begriff. Licht und Materie fallen zwar beide in ein und dieselbe Sphäre des Seins, aber sie verhalten sich innerhalb dieser Sphäre wie Ideales und Reales, wie Begriff und Ding. Sofern das Licht nun ein Begriff ist, so ist es etwas Subjectives, sofern es aber der äusserliche Begriff der Materie ist, insofern ist es

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

bis 444. Merkwürdig ist Schelling's Stellung zur Atomistik. Die Materie als Product ist bis ins Unendliche theilbar, denn jeder Theil der Materie muss wieder Materie und somit theilbar sein. Insofern aber die Materie Product von Thätigkeiten ist, hat sie auch einfache, untheilbare Elemente, denn „jede solche Action ist wahrhaft individuell". „Die Naturphilosophie ist also weder dynamisch in der bisherigen Bedeutung des Wortes, noch atomistisch, sondern dynamische Atomistik." Sämmtl. Werke III, p. 21 bis 23. „Der Corpuscularphilosoph hat vor dem sogenannten dynamischen Philosophen dadurch doch unendlich viel voraus, dass er durch seine Atomen, deren jeder eine individuelle Figur hat, etwas ursprünglich Individuelles in die Natur bringt, nur dass diese Atomen, da sie selbst schon Product sind, als Erstes oder Letztes in der Natur unmöglich können eingeräumt werden, daher die Naturphilosophie (die dynamische Atomistik) an ihre Stelle einfache Actionen, d. h. das Letzte in der Natur, setzt, was rein productiv ist, ohne Product zu sein." Sämmtl. Werke, III, p. 102.

[1]) „Dieses Princip (alles in der Natur zu fluidiren) wird Wärmeprincip genannt, das sonach keine einfache Substanz, überhaupt keine Materie, sondern immer nur Phänomen der beständig verminderten Capacität (der ursprünglichen Actionen für einander) . . . ist. — Neue Theorie der Wärme nach diesen Grundsätzen." Sämmtl. Werke III, p. 32.

[2]) Sämmtl. Werke III, p. 103 bis 104.

[3]) Ibid. III, p. 104 bis 136.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

etwas Objectives. Die ganze Natur ist nun eine Entwickelung von Stufen, in der jede Stufe wie das Licht gegen die vorhergehende ideal, gegen die folgende real ist. Die ganze Natur ist eine Einheit. In der organischen wie in der unorganischen Natur wirken dieselben Kräfte in denselben Formen. Ueberall zeigt sich der Gegensatz der Thätigkeiten, die Polarität der Wirkungen, die sich in ihrem Producte als einer höheren Einheit vereinigen. Die Actionen der unorganischen Natur sind in steigender Stufenfolge Chemismus (Licht), Elektricität und Magnetismus, ihnen entsprechen in der organischen Natur Reproductivität, Irritabilität und Sensibilität[1]). In allen diesen Erscheinungen sind Gegensätze thätig, die sich durch ihre Ausgleichung zu einer höheren Einheit erheben[2]).

Die Ideen einer Einheit der ganzen Natur, der überall herrschenden Polarität in derselben und der daraus hervorgehenden Entwickelung zum Vollkommenen, die Schelling mit eben so viel Kühnheit als Genialität in blühender Sprache verfocht, waren es, welche ihm eine bedeutende Anzahl von Anhängern auch unter den Naturwissenschaftlern, vor Allem unter den Physiologen verschafften. Sie trieben ihn aber auch dazu, die Vorgänge der unorganischen Natur immer mehr vom organischen, vom intellectuellen, idealen Gesichtspunkte aus zu behandeln und sich damit immer mehr vom Boden der Erfahrung zu entfernen. Sie veranlassten ihn, den damals wieder auftauchenden Gedanken des thierischen Magnetismus freudig aufzunehmen und brachten ihn dazu, die Versuche, welche der eben so geniale wie phantastische Physiker Ritter damals in München anstellte, enthusiastisch zu begrüssen. Schelling schreibt darüber in einem Briefe an Hegel[3]): „Wir sind gegenwärtig hier alle mit höchst wundersamen Dingen beschäftigt. — Vor einiger Zeit kam die Nachricht aus Italien, dass an der Tyroler Grenze ein Erz- und Wasserfühler lebe; der für alles ihm dargelegte Grosse und Gute wirklich empfängliche Minister beschloss, auf gegebene Vorstellung, dass Ritter dahin reisen sollte — und siehe, es hat sich noch weit mehr gefunden . . . Nehme, um Dich zu überzeugen, einen Würfel von beliebiger Materie, Schwefelkies z. B., gediegenen Schwefel, Metall, vorzüglich Gold, hänge ihn wagerecht an einem nassen Faden auf, den Du stets zwischen den Fingern hältst, und über Wasser und Metall geräth der Körper bald in elliptische, immer mehr der Kreisform sich annähernde Schwin-

---

[1]) Sämmtl. Werke, III, p. 207 bis 220.

[2]) Ibid. III, p. 207. „Und so wäre es denn wohl an der Zeit, auch in der organischen Natur jene Reihenfolge aufzuzeigen, und den Gedanken zu rechtfertigen, dass die organischen Kräfte, Sensibilität, Irritabilität und Bildungstrieb alle nur Zweige Einer seien, ebenso ohne Zweifel, wie im Licht, in der Elektricität u. s. w. nur Eine Kraft als in ihren verschiedenen Erscheinungen hervortritt.“

[3]) Aus Schelling's Leben, Leipzig 1870. II, p. 112 bis 114. Der Brief ist datirt vom 11. Januar 1807.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

gungen. . . . Ueber dem Nordpol schwingt sich das Pendel in dieser Richtung ○↖, über dem Südpol eines Magnets in dieser ○↙; ebenso verhalten sich die Schwingungen über Silber, Kupfer u. s. w. zu denen über Zink, Wasser. Aber noch mehr, Ritter hat in Mailand einen Abbate gefunden, der auf diese Weise den ganzen menschlichen Körper durchprobirt hat. Mache Versuche über dem Kopfe, den Gesichtstheilen, den Fingern, äusserer und innerer Fläche der Hand, rechter und linker Seite, überall wirst Du denselben Gegensatz finden. Ueber dem Stielende des Apfels schwingt das Pendel wie über dem Nordpol, über dem entgegengesetzten wie über dem Südpol. So verhält sich auch das contrahirte und expandirte Ende eines Ei. . . . Aber auch die eigentliche Wünschelruthe schlägt uns allen, über der kleinsten Masse von Metall oder Wasser, d. h. uns allein, die wir uns damit beschäftigen, denn Vielen hat die Natur die Kraft versagt, oder die Lebensart geraubt. Es ist die wirkliche Magie des menschlichen Wesens, kein Thier vermag sie auszuüben. . . . Ritter will ein eigenes Journal anlegen unter dem Titel: Der Siderismus. . . . Er hat den Erz- und Wasserfühler hier mit her gebracht, und wird aus diesem neuen Phänomen viel Herrliches ziehen."

Die Physiker kämpften, mit wenigen Ausnahmen, eifrig gegen diese neue Art des Experimentirens. In mehreren Artikeln [1]) von Gilbert's Journal wurde nachgewiesen, dass die beschriebenen Erscheinungen entweder ganz ausblieben oder durch unmerkliche unbewusste Bewegungen der Hand verursacht wurden, die selbst wieder durch Bewegungen der Augen, leise Bewegungen des Kopfes hervorgerufen sein könnten. Danach begegneten Schelling's Schriften immer mehr Misstrauen unter den Physikern, und wie er selbst sich immer mehr von der Natur zurückzog, so wandten sich auch die Naturwissenschaftler von seiner Philosophie ab [2]).

Damit aber kam man auf physikalischer Seite immer mehr zur Verachtung oder gar zum Hasse der Naturphilosophie, und bald näherte man sich einem Standpunkte, wo in der Lehre von der Materie alles verboten, aber darum auch alles erlaubt schien. Man vermied zum mindesten, von der Constitution der Materie und der Natur ihrer Kräfte zu sprechen, und nur die Schriften einiger bedeutender Physico-Mathe-

---

[1]) Gilbert's Annalen der Physik und Chemie, XXVII, S. 1 bis 77, 158 bis 230, 328 bis 341, 477 bis 488; 1807.

[2]) Friedr. Wilh. Joseph Schelling ist am 27. Januar 1775 in Leonberg in Württemberg als Sohn eines Landgeistlichen geboren. Michaelis 1790 trat er in das theologische Seminar zu Tübingen. 1796 und 1797 war er als Hofmeister in Leipzig und beschäftigte sich mit naturwissenschaftlichen und mathematischen Studien. 1798 Professor in Jena, 1803 in Würzburg, 1806 Mitglied der Akademie der Wissenschaften in München, später deren beständiger Secretair. 1841 Mitglied der Akademie der Wissenschaften in Berlin. Schelling verheirathete sich 1803 mit Caroline Schlegel, geb. Michaelis, verwittwete Böhmer, die 1809 starb. Er selbst starb am 20. Aug. 1854 in Ragaz.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

matiker bieten hinreichendes Material, um aus ihnen die herrschende Theorie der Materie construiren zu können.

Am ehesten lassen sich dazu die Schriften von Laplace[1]) gebrauchen, der vielfach und verhältnissmässig ausführlich seine diesbezüglichen Ansichten auseinander setzt. Laplace's Theorie[2]) ist kurz die folgende: „Um bei diesen (relativen) Bewegungen eine Grenze zu denken, und endlich zu festen Punkten zu gelangen, von welchen an man die absolute Bewegung der Körper rechnen könne, bildet man sich einen unbegrenzten, unbeweglichen und von der Materie durchdringlichen Raum ein. Auf die Theile dieses, wirklichen oder eingebildeten, Raumes beziehen wir in Gedanken die Lage der Körper und denken sie in Bewegung, wenn sie nach und nach mit verschiedenen Orten dieses Raumes zusammentreffen. Die Natur dieser sonderbaren Modification, vermöge welcher ein Körper aus einem Orte in einen anderen versetzt wird, ist bis jetzt unbekannt und wird es ferner bleiben. Man hat sie mit dem Namen der Kraft bezeichnet, aber man kann bloss ihre Wirkungen und das Gesetz ihrer Wirkungsart bestimmen[3])."

„Ein in Ruhe befindlicher Punkt kann sich selbst keine Bewegung geben, weil in ihm kein Grund liegt, sich viel mehr nach der einen als nach der anderen Richtung zu bewegen. Die geradlinige Bewegung (eines sich selbst überlassenen Körpers) folgt offenbar daraus, dass kein Grund vorhanden ist, warum der Punkt viel mehr zur Rechten als zur Linken von seiner ursprünglichen Richtung abweichen sollte; aber die Gleichförmigkeit seiner Bewegung ist nicht von gleicher Evidenz; da die Natur der bewegenden Kraft unbekannt ist, so ist es unmöglich a priori zu wissen, ob diese Kraft sich ohne Aufhören erhalten müsse. In der That, da ein Körper unfähig ist, sich selbst eine Bewegung zu geben, so scheint er ebenso unfähig zu sein, die erhaltene zu verändern, so dass also das Gesetz der Trägheit wenigstens das Natürlichste und Einfachste ist,

---

[1]) Pierre Simon Laplace, geboren am 28. März 1749 in Beaumont-en-Auge, gestorben am 5. März 1827 in Paris. Zuerst Lehrer der Mathematik in seinem Geburtsort, dann in Paris Examinator beim königl. Artilleriecorps, später Lehrer an der École normale. 1799 Minister des Inneren, dann Mitglied des Sénat conservateur. Durch Napoleon comte de l'empire; durch Louis XVIII. Pair, und 1817 Marquis. Von seinem umfassendsten Werke Traité de Mécanique céleste erschienen 1799 der I. und II. Bd., 1802 der III., 1805 der IV.; vom V. Bande wurden das 11. und 12. Buch 1823, das 13. bis 15. Buch 1824, und das 16. Buch im Jahre 1825 veröffentlicht.

[2]) Traité de Mécanique céleste, Vol. I. u. II., Paris 1799. Exposition du système du monde, Paris 1796, ins Deutsche übersetzt von K. F. Hauff, Frankfurt a. M. 1797. Spätere Aufsätze in den Annales de chimie et de physique, XXI ff.

[3]) Darstellung des Weltsystems durch P. S. Laplace, Frankfurt a. M. 1797, S. 265.

was man sich denken kann; es ist überdies durch die Erfahrung bestätigt[1])."

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

„Da die Kraft nur durch den Raum bekannt ist, welchen sie den Körper in einer bestimmten Zeit zurückzulegen treibt, so ist es natürlich, diesen Raum für ihr Maass anzunehmen." Dies setzt aber voraus, dass die Kräfte, welche nach einer Richtung wirken, sich einfach summiren. Allein dieses können wir aus Mangel einer Kenntniss von der Natur der bewegenden Kraft nicht a priori wissen und müssen daher auch noch über diesen Gegenstand die Erfahrung zu Rathe ziehen."

„Hier sind also zwei Bewegungsgesetze, nämlich das Gesetz der Trägheit und das Gesetz der Proportionalität von der Kraft und Geschwindigkeit, die durch die Beobachtungen gegeben sind. Sie sind die natürlichsten und einfachsten, die man sich denken kann, und ohne Zweifel fliessen sie aus der Natur der Materie selbst her. Da aber diese Natur unbekannt ist, so sind diese Gesetze für uns bloss beobachtete Thatsachen, übrigens die einzigen, welche die Mechanik von der Erfahrung entlehnt[2])."

„Man sieht, dass überhaupt bei der gegenseitigen Wirkung der Körper auf andere, die Gegenwirkung immer der Wirkung gleich und entgegengesetzt ist. Man sieht ferner, dass diese Gleichheit keine besondere Kraft in der Materie voraussetzt, sondern daraus folgt, dass ein Körper durch die Wirkung eines andern keine Bewegung erhalten kann, ohne ihn deren zu berauben, ebenso wie ein Gefäss auf Kosten eines anderen vollen, das ihm mittheilt, angefüllt wird."

„Die Wahrscheinlichkeit einer Theorie kann man theils durch Verminderung der Zahl der Hypothesen, auf welche man sie gründet, theils durch Vermehrung der Zahl der Erscheinungen, welche sie erklärt, vergrössern. Der Grundsatz der Schwere hat der Theorie von der Bewegung der Erde diese beiden Vortheile verschafft. . . . Ohne sie wären die elliptische Gestalt der Planetenbahnen, die Gesetze, welchen die Planeten und Kometen bei ihrer Bewegung um die Sonne folgen, ihre secularen und periodischen Ungleichheiten, die zahlreichen Ungleichheiten des Mondes und der Jupitertrabanten, das Vorrücken der Nachtgleichen, das Wanken der Erdachse, die Bewegungen der Mondachse, endlich die Ebbe und Fluth des Meeres, lauter einzelne Resultate ausser aller Verbindung. . . . Ist aber dieser Grundsatz ein ursprüngliches Naturgesetz? ist es nicht bloss eine allgemeine Wirkung einer unbekannten Ursache? Hier nöthigt uns die Unwissenheit, worin wir uns in Ansehung der inneren Eigenschaften der Materie befinden, stille zu stehen und benimmt

[1]) Darstellung des Weltsystems, S. 269 ff.
[2]) Ibid. S. 279 ff.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

uns alle Hoffnung, diese Fragen auf eine befriedigende Art zu beantworten. Anstatt Hypothesen darüber aufzustellen, schränken wir uns darauf ein, die Art, wie der Grundsatz der Gravitation von den Geometern angewandt worden ist, noch umständlicher zu untersuchen. Sie sind von den fünf folgenden Voraussetzungen ausgegangen: 1) dass die Gravitation unter den kleinsten Theilchen der Körper statt hat; 2) dass sie den Massen proportional sei; 3) dass sie sich umgekehrt verhalte wie die Quadrate der Entfernung; 4) dass sie in einem Augenblicke von einem Körper zum andern übergehe; 5) endlich, dass sie auf gleiche Art auf ruhende Körper und auf solche wirkt, die, da sie schon nach ihrer Richtung in Bewegung sind, sich ihrem Einflusse zum Theil zu entziehen scheinen[1]."

Die erste Voraussetzung ist, wie wir gesehen haben, eine nothwendige Folge der Gleichheit zwischen der Wirkung und Gegenwirkung und ist, wie auch die zweite, durch die Erfahrung bewiesen. Die dritte gilt nicht bloss für die Schwere, sondern „ist das Gesetz aller Ausflüsse, die von einem Mittelpunkt ausgehen, dergleichen das Licht ist; es scheint sogar, dass alle Kräfte, deren Wirkung sich auf merkliche Entfernungen äussert, diesem Gesetze folgen. Seit Kurzem hat man bemerkt, dass die elektrischen und magnetischen Anziehungen und Abstossungen im Verhältniss des Quadrates der Entfernung abnehmen." „Wir haben kein Mittel, um die Zeit der Fortpflanzung der Schwere zu messen, weil die Sonne, wenn ihre Attraction einmal die Planeten erreicht hat, so auf sie zu wirken fortfährt, als ob ihre Anziehungskraft den äussersten Enden unseres Planetensystems sich augenblicklich mittheile." . . . Aus der Aenderung der Einwirkung der Schwere auf die Körper nach ihrer Richtung und Geschwindigkeit kann man aber folgern, dass diese Kraft mit einer Geschwindigkeit wirkt, „die wir als unendlich bezeichnen können, und wir müssen daraus schliessen, dass die Attraction sich den äussersten Enden unseres Sonnensystems in einem beinahe untheilbaren Augenblick mittheile".

„Die Anziehungskraft verschwindet unter Körpern von unbeträchtlicher Grösse; sie erscheint aber wieder bei ihren Elementen unter einer unendlichen Menge verschiedener Formen. . . . Aber sind diese Kräfte (Dichtigkeit, Krystallisation, chemische Verwandtschaft) wirklich die in den Räumen des Himmels beobachtete Gravitation, die nur auf der Erde durch die Gestalt der kleinsten Theilchen modificirt wird? Um diese Hypothese anzunehmen, müsste man bei den Körpern vielmehr leeren, als gefüllten Raum voraussetzen, so dass die Dichtigkeit ihrer Theilchen unvergleichbar grösser wäre, als die mittlere Dichtigkeit ihrer Massen. . . . Das Verhältniss der Zwischenräume dieser Elemente wäre von der

[1]) Darstellung des Weltsystems, S. 203 ff.

nämlichen Ordnung wie bei den Sternen, welche einen Nebelfleck bilden, den man aus diesem Gesichtspunkte als einen grossen leuchtenden Körper betrachten könnte. Uebrigens hindert uns Nichts, diese Vorstellungsart von allen Körpern anzunehmen. Mehrere Erscheinungen, und unter andern die äusserste Leichtigkeit, womit das Licht die durchsichtigen Körper nach allen Richtungen durchdringt, sind ihr günstig." „Die Verwandtschaften würden alsdann von der Gestalt der integrirenden Theilchen abhängen, und man könnte aus der Mannigfaltigkeit dieser Gestalten alle Verschiedenheit der Anziehungskräfte erklären und auf solche Art alle Erscheinungen der Physik und Astronomie auf ein allgemeines Gesetz zurückführen." . . . „Einige Geometer haben, um von den Verwandtschaften Rechenschaft zu geben, zu dem Gesetze der Attraction im umgekehrten Verhältniss des Quadrates der Entfernungen neue, nur in sehr kleinen Entfernungen merkliche Glieder hinzugesetzt. Aber diese Glieder würden ebenso viele verschiedene Kräfte ausdrücken . . . bei diesen Ungewissheiten ist es das Klügste, was man thun kann, sich an die Bestimmung der Gesetze der Verwandtschaften durch zahlreiche Versuche zu halten. Das einfachste Mittel, dazu zu gelangen, scheint die Vergleichung dieser Kraft mit der zurückstossenden Kraft der Wärme zu sein, die man stets wiederum mit der Schwere vergleichen kann. Einige mit diesem Mittel bereits gemachte Versuche lassen hoffen, dass dieses Gesetz einst vollkommen wird bekannt werden; alsdann könnte man, durch Anwendung der Rechnung auf dasselbige, die Physik der Erdkörper zu eben dem Grade der Vollkommenheit erheben, den die Entdeckung der allgemeinen Schwere der Physik des Himmels verschafft hat[1])."

Aehnliche, ja principiell ganz gleiche Ansichten entwickelt Biot[2]) in seinen Lehrbüchern der Physik. Zwei wesentliche Eigenschaften zeigt die Materie, an denen wir ihr Dasein überhaupt erkennen, die Ausdehnung und die Undurchdringlichkeit, über die wir durch Gesichts- und Gefühlssinn urtheilen. Die Undurchdringlichkeit ist aber nicht den Körpern als solchen, sondern nur den kleinsten Theilchen derselben eigen, wie die Zertheilung derselben zeigt. Diese letzten Theilchen zeigen sich unserer Erfahrung unzugänglich; daraus aber „lässt sich keineswegs schliessen, dass die Gestalt und Natur derselben für uns gleichgültig und auf die Eigenschaften, die wir an jedem, aus ihnen zusammengesetzten Körper wahrnehmen, ohne Einfluss sein müsse". Vielmehr wird man im Verfolg dieses Werkes mehrere Erscheinungen finden, welche auf eine ähnliche Ursache hinweisen. Dergleichen bieten sich dar bei der Art, wie sich die Flüssigkeiten ausdehnen, bei dem Akt ihres

---

[1]) Darstellung des Weltsystems, S. 211 ff. — [2]) Traité de physique expérimentale et mathématique, Paris 1816. Précis élémentaire de Physique expérimentale, Paris 1816; ins Deutsche übersetzt von Fechner unter dem Titel „Lehrbuch der Experimental-Physik", Leipzig 1824.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

Festwerdens, noch auffallender aber bei der Krystallisation der Salze. „Die Metaphysiker und selbst die Physiker haben viel darüber gestritten, ob eine Theilbarkeit der Materie bis ins Unendliche möglich sei oder nicht. Man sieht nach dem Vorerwähnten, dass dieser Frage für uns alle Anwendbarkeit abgeht. Will man von Theilbarkeit im abstracten und geometrischen Sinne sprechen, so lässt sich ohne Zweifel keine Grenze derselben annehmen. Denn wie unendlich klein man sich auch ein Theilchen denken mag, so führt doch schon der Begriff seiner Ausdehnung mit sich, dass es noch in zwei Hälften theilbar gedacht werden müsse, jede dieser Hälften wiederum in zwei und so fort bis ins Unendliche. Allein was eine reelle und physische Theilbarkeit betrifft, so lässt sich über diese geradehin nichts aussagen, da uns keine der Verfahrungsarten, in deren Besitz wir sind, in den Stand setzt, die letzten Theilchen der Körper selbst gesondert darzustellen und einzeln ihre Unwandelbarkeit zu prüfen."

„Wie aber kann ein solches System von Theilchen seinen Aggregatzustand in formfester und widerstehender Masse, in welcher Art uns eine grosse Menge Körper, ja alle, wenn sie unter die gehörigen Umstände gebracht werden, erscheinen, behaupten? Im Verfolg dieses Werkes wird sich ergeben, dass dieser Zustand durch Naturkräfte hervorgebracht und erhalten wird, durch die alle Körpertheilchen belebt (animées) sind, und vermöge deren sie nacheinander wechselseitig hinstreben, als ob sie sich anzögen. Wären aber diese Kräfte allein vorhanden, so würden die Theilchen sich einander bis zur Berührung nähern, das heisst, bis sich ihre eigene Undurchdringlichkeit dem weiteren Zusammenrücken entgegensetzte, ein Zustand, in dem sie sich unstreitig nicht wirklich befinden, da sie in allen Körpern einer noch grösseren Annäherung oder Entfernung hinlänglich freien Spielraum gestatten. Auch wird sich uns eine allgemeine Ursache innerer Abstossung ergeben, durch welche allen anziehenden Kräften beständig die Wage gehalten wird. Diese, in allen Naturkörpern sich vorfindende Ursache scheint im Wärmeprincip zu liegen. Die Theilchen jedes Körpers, durch diese beiden Arten entgegengesetzter Kräfte zugleich sollicitirt (zur Bewegung angetrieben), setzen sich von selbst in den Zustand des Gleichgewichts, den die Compensation ihrer Energien zur Folge hat, und rücken näher zusammen oder weiter auseinander, je nachdem die äusseren Kräfte, denen man sie aussetzt, die Anziehung oder Abstossung begünstigen. So bewegen sich und oscilliren auch die Gestirne, welche unser Planetensystem ausmachen, in ihren elliptischen, stets veränderlichen Bahnen, ohne dass der Untergang des Systems oder eine Störung des allgemeinen Gleichgewichts erfolgt. Auf diesen verschiedenen Zuständen des Gleichgewichts der Körpertheilchen beruhen, wie wir weiterhin erörtern werden, alle secundären und veränderlichen Eigenschaften, als der luftförmige Zustand, die Flüssigkeit, die Festigkeit, das krystallinische Gefüge, die Härte, die Elasticität u. s. w.

Naturphilosophie, c. 1780 bis c. 1820.

Bei allen diesen Erscheinungen verhalten sich die materiellen Molecüle, wie ebensoviel durchaus träge Massen, d. h. solche, denen jede Art der Spontaneität (Selbstthätigkeit) mangelt. Sie können bewegt, aus der Stelle gerückt, in der Bewegung aufgehalten werden, doch nur durch fremde, ausser ihnen selbst liegende Ursachen; nie vermögen wir die geringste Spur eigenen und freien Willens in ihnen zu entdecken." „Dieses gleichgültige Verharren in jedem Zustande, dieser Mangel an Spontaneität, hat den Namen der Trägheit oder des Beharrungsvermögens (inertie, inertia) erhalten." „Die Erfahrung lässt uns noch mehrere andere, nicht im Wesen der Materie nothwendig begründete Eigenschaften erkennen, d. h. solche, die nicht unumgänglich erforderlich scheinen, um die materiellen Körper uns zur Wahrnehmung zu bringen, deren Kenntniss jedoch sehr wichtig ist, weil man sie immer mit den ursprünglichen Bedingungen der Materialität in Verbindung antrifft, so dass in einer grossen Zahl von Fällen, wo es unmöglich wird, zur unmittelbaren Wahrnehmung dieser Bedingungen zu gelangen, dieselben mittelbar an dem Dasein jener erkannt werden können."

„Auch die Anziehung (attraction, attractio) ist eine der zufälligen Eigenschaften, welche, im Fall die unmittelbaren Sinneswahrnehmungen uns im Stiche lassen, noch als Zeuge für die Materialität auftreten kann. Weiter oben habe ich gesagt, dass die Theilchen aller bekannten Körper durch anziehende und abstossende Kräfte (Attractiv- und Repulsivkräfte) aufeinander wirkten; umgekehrt wird man durch die Nachweisung der Gegenwart oder Wirksamkeit dieser allgemeinen Kräfte in einem unbekannten Princip, zum Schluss auf die Materialität dieses Princips berechtigt. So ist das Licht nicht tastbar, man kann an ihm keine Ausdehnung erkennen, es ist nicht wägbar, wenigstens nicht durch unsere Wagen, es ist so fein, dass es allen Mitteln, wodurch unsere Sinne es zu fassen vermöchten, entschlüpft. Lassen wir es aber durch durchsichtige Körper hindurchgehen, so sehen wir es sich beim Durchgange beugen und krümmen, gerade, als wenn es durch eine von der Oberfläche dieser Körper ausgehende Kraft abgestossen würde, angezogen dagegen in ihrem Innern durch die Molecüle, aus denen sie bestehen. Diese Erscheinungen zusammengenommen können uns also schliessen lassen, dass das Licht eine materielle Substanz sei, bestehend aus ausnehmend kleinen Theilchen, deren Gestalt hinsichtlich gewisser Flächen symmetrisch ist, welche eigenthümlicher Anziehung und Abstossung fähig sind, die endlich im leeren Raume oder in den durchsichtigen Körpern mit einer gegebenen und messbaren Geschwindigkeit sich bewegen."

„Es giebt noch andere Principe, welche auf die materiellen Körper einwirken, ohne sichtbar oder tastbar, oder durch irgend eine Wage wägbar zu sein, die selbst unseren Sinnen nicht so viel materielle Charaktere, als das Licht, darzubieten scheinen, für deren Materialität dessen ungeachtet eben so starke, wo nicht noch stärkere

Naturphilosophie, c. 1780 bis c 1820.

Gründe sprechen. Von dieser Art sind die unbekannten Principe der beiden Elektricitäten, welche man Harzelektricität und Glaselektricität nennt."

„Die nämlichen Wahrscheinlichkeitsgründe gelten auch für die beiden magnetischen Principe, die sich in verschiedenen Metallen entwickeln lassen. Noch weniger sichere Data haben wir für die Materialität des Princips der Wärme, welchem man häufig den Namen Wärmestoff (calorique, caloricum) giebt. Ihm gehen nicht nur, wie den vorigen, die in die Sinne fallenden Eigenschaften ab, welche die Materie charakterisiren, sondern bei der noch unvollständigen Kenntniss der Gesetze seiner Bewegung und seines Gleichgewichts, ist man auch noch nicht einmal im Stande, ähnliche Wahrscheinlichkeitsgründe für dasselbe in Anwendung zu bringen. Die Erfahrung lehrt uns, dass es sich in den Körpern verbreitet, von einem zum andern übergeht, darin gebunden und daraus wieder frei wird, die Anordnung, die Abstände, die anziehenden Eigenschaften ihrer Theilchen modificirt. Allein alles dies giebt keinen unwidersprechlichen Beweis ab, dass dies Princip selbst ein Körper sei. Die stärkste Andeutung dafür, die wir haben, dürfte vielleicht in einigen, kürzlich entdeckten Analogien zwischen den Eigenschaften der Strahlung der Wärme und des Lichts zu finden sein, welche darauf hinweisen, dass die Principe, welche der Erregung der Wärme- und Lichtempfindung zu Grunde liegen, sich allmählich ineinander verwandeln können, das heisst, dass sie die Modificationen, unter welchen sie in uns entweder die eine oder die andere Empfindung hervorbringen, successiv annehmen oder verlieren können [1]."

Auf die Entwickelung der chemischen Atomentheorie, wie sie von Dalton [2]) begonnen wurde, einzugehen, müssen wir uns hier, um nicht zu weitschweifig zu werden, versagen. Wir können dies um so eher, als diese Theorie, in derem Baue sich allerdings die Chemie stolz entwickelt hat, doch zuerst nur für speciell chemische Zwecke zurecht gemacht und erst später allgemeiner ausgebildet und damit auch allgemeiner wichtig wurde.

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

Die Erscheinungen der latenten und der specifischen **Wärme** hatten einzelne Physiker noch in der vorigen Periode der Physik zur Annahme eines eigenen Wärmestoffes geführt. Die Emissionstheorie des Lichts begünstigte die Annahme eines besonderen Lichtstoffes, elektrische und magnetische Erscheinungen glaubte man durch besondere Flüssigkeiten verursacht. Da man nun weiter zu bemerken meinte, dass die Wärme sich wie jeder andere Stoff mit den Körpern chemisch verbinden und dann wie jeder andere Stoff auch wieder

---

[1]) Lehrb. d. Experimentalphysik I, S. 5 bis 25.

[2]) John Dalton, A new system of chemical philosophy, London 1808; second. edit., London 1842.

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

aus den Verbindungen ausgeschieden werden könnte, so musste naturgemäss die Annahme eines besonderen Wärmestoffes die Mehrzahl der Physiker für sich haben. Kries fügt seiner Uebersetzung der Euler'schen „Briefe an eine deutsche Prinzessin" einen besonderen Abschnitt ein, der für die Neigung der damaligen Zeit, alle Undulationstheorien zu vermeiden, charakteristisch ist. „Man hat sonst dem Lichte zwei Eigenschaften zugeschrieben, die Kraft zu leuchten und die Kraft zu erwärmen. Diejenigen, die das Licht für Schwingungen des Aethers hielten, glaubten, dass die Wärme in ähnlichen Schwingungen und in einer Bewegung bestände, die in den Theilen der Körper selbst dadurch hervorgebracht werde. Allein in den neuesten Zeiten hat man die Wärme von dem Lichte getrennt, und betrachtet sie nicht mehr als eine unmittelbare Wirkung desselben. Die Chemiker nehmen eine eigene Materie als die Ursache der Wärme an, die sie den Wärmestoff nennen, der eine vorzügliche Verwandtschaft gegen das Licht hat, sich mit ihm verbindet, und dadurch sowohl selbst eine grössere Wirksamkeit erhält, als auch dem Lichte die wärmende Kraft mittheilt." Man hat auch von dem Lichte Wirkungen wahrgenommen, die sich unmöglich aus blossen Schwingungen erklären lassen, und die es mehr als wahrscheinlich machen „dass das Licht bei sehr vielen Processen der Natur als ein wirklicher Bestandtheil, als etwas körperliches wirke"…. Vermittelst des Sonnenlichtes kann man z. B. aus den grünen Blättern der Bäume und Gesträuche, die man ins Wasser legt, eine sehr reine Luftart erhalten, die man dephlogistisirte Luft nennt. Allein dasselbe Wasser, einerlei Blätter, der nämliche Grad der Wärme — ohne Licht giebt Nichts. . . . Hieraus ersieht man, „dass das Licht eine Kraft hat, in gewissen Körpern eine Zersetzung einiger ihrer Bestandtheile hervorzubringen, und also gerade so wie andere chemische Substanzen, deren Natur nicht in Schwingungen besteht, zu wirken [1]".

Je mehr man aber zur Erklärung der verschiedenen physikalischen Erscheinungen besondere hypothetische Flüssigkeiten aufnahm, desto schwerer wurde es, dieselben gehörig zu charakterisiren und für den Wärmestoff vor Allen war das Wesen und der Zusammenhang mit den anderen Flüssigkeiten, wie z. B. dem Lichtstoff, schwer zu bestimmen. Ist der Wärmestoff nur eine Modification der Lichtmaterie, oder ist er wirklich eine eigene, ursprüngliche Substanz, und wenn das letztere der Fall, ist die Substanz einfach oder zusammengesetzt? Zwischen diesen Extremen hat man lange Zeit geschwankt. Die Phlogiston-Chemiker hatten den Wärmestoff einfach mit dem Phlogiston identificirt; da aber dieses letztere aus dem Reiche des Existenten verwiesen wurde, so musste auch jene Annahme bald fallen. Deluc versuchte in seinen Nouvelles Idées sur la Météorologie (Paris 1787) den Wärmestoff für eine zusammengesetzte Substanz auszugeben, um dadurch

[1]) Leonh. Euler's Briefe, Leipzig 1792, I, S. 241 bis 244.

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

den Zusammenhang zwischen Wärme und Licht erklären zu können. Er nahm an: der Wärmestoff bestehe, wie alle elastischen Flüssigkeiten, aus einer schweren Grundsubstanz und einer expansiven Materie (fluide déférent); der ponderable Theil des Wärmestoffs sei die Feuermaterie, die niemals allein dargestellt werden könne, der andere Theil desselben sei der Lichtstoff. Durch die Verbindung mit der Feuermaterie verliert der Lichtstoff die Kraft zu leuchten, dafür erhält die Verbindung die Kraft zu wärmen. Wie die Wasserdämpfe beim Zusammenpressen in Wasser und Wärmestoff zerlegt werden, so zersetzt sich der letztere, wenn er in den Körpern bis zu einem gewissen Grade verdichtet wird, wenigstens theilweise in seine Bestandtheile, er giebt Lichtstoff ab und wird leuchtend. Die Sonnenstrahlen sind nicht an sich warm, sondern erregen erst das Gefühl von Wärme, wenn sie sich mit der Feuermaterie der Körper zu Wärmestoff verbinden. Daraus erklärt sich die niedrige Temperatur auf hohen Bergen, die Dunkelheit des Sonnenkerns trotz der ihn umgebenden Lichtsphäre, vielleicht auch die Verschiedenheit der Klimate unter gleichen Breiten u. s. w. Deluc's Ansichten fanden viele und manche recht begeisterte Anhänger, verschwanden aber schliesslich doch schneller, als man nach ihren ersten Erfolgen hätte erwarten sollen. Die Hauptursache dafür lag in der Complicirtheit ihrer Principien. Wo man schon mit einer hypothetischen Flüssigkeit auskommen konnte, da mochte man mit Recht nicht zwei annehmen. So blieb es schliesslich bei dem Wärmestoff als einer einfachen, elementaren, expansiven Flüssigkeit, die gänzlich von allen anderen Stoffen verschieden, nur zu dem Lichtstoffe in gewissen, übrigens noch recht unklaren Beziehungen stand.

Crawford's berühmte Schrift von der Wärme [1]) war allen directen Untersuchungen über die letzte Ursache der Wärmeerscheinungen vorsichtig aus dem Wege gegangen. Lichtenberg aber sprach entschieden aus, dass jenem Werke die Annahme eines besonderen Wärmestoffs unzweifelhaft zu Grunde liege. Die Chemiker und Physiker tauften dann die neue Materie, welche die Ursache aller Wärmeerscheinungen sein sollte, mit dem Namen Caloricum, und diesen Namen hat sie bis an ihr Ende behalten. Lavoisier erzählt in seinem Traité élémentaire de chimie (Paris 1789): „Als ich mit de Morveau, Berthollet und de Foucroy in der Absicht gemeinschaftliche Sache machte, die Sprache der Chemiker zu verbessern . . ., bezeichneten wir die Ursache der Wärme, jene so ausserordentlich elastische Flüssigkeit, wodurch dieselbe erzeugt wird, mit der Benennung calorique [2])."

Da der neue Stoff mit anderen Stoffen nicht zu identificiren und aus anderen Stoffen nicht zusammengesetzt war, blieb über das Wesen

[1]) Exper. and observ. on animal heat and the inflammation of combustible bodies, London 1779; 2. Aufl. London 1788.

[2]) Rühlmann, Mechanische Wärmetheorie, Braunschweig 1885, II, S. 894.

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

desselben allerdings nichts weiter zu sagen, dafür aber drängte sich um so mehr die Frage nach den Eigenschaften und vor Allem die Untersuchung über die Schwere dieses Wärmestoffes auf. Vielfache Wägungen hatten zu direct widersprechenden Resultaten geführt. Boyle, Buffon, in neuerer Zeit Marat[1]) u. A. zogen aus ihren Versuchen den Schluss, dass Körper erhitzt schwerer seien als kalt; andere Physiker, wie Whitehurst und Roebuck, Fordyce, Guyton de Morveau etc. dagegen kamen zu dem gegentheiligen Resultat. Doch wusste man nun schon, dass keine der beiden Parteien ihre eigentliche Aufgabe gelöst. Man erklärte ganz richtig die beobachteten Gewichtszunahmen durch Oxydationen und andere chemische Veränderungen, welche die betreffenden Körper bei dem Erhitzen erleiden, und führte ebenso wahr die beobachtete Gewichtsabnahme auf die Wirkung von Luftströmen zurück, welche an dem erhitzten Körper aufsteigen. In der That konnte auch Graf Rumford[2]) bei den allersorgfältigsten Wägungen, wenn nur die Einwirkung jener Umstände sorgfältig ausgeschlossen wurde, weder ein Schwerer- noch ein Leichterwerden der Körper bei der Erhitzung bemerken. Danach gab man die Gedanken an eine positive, wie an eine negative Schwere des Wärmestoffes ganz auf und blieb bei dem negativen Ergebniss, dass derselbe gar keine Schwere, weder eine negative noch eine positive habe. Der Wärmestoff theilte damit das Schicksal der andern hypothetischen Flüssigkeiten, des Lichts, der magnetischen und elektrischen Flüssigkeiten, er wurde, aus der Ordnung der gewöhnlichen Materie ausscheidend, zu einem Imponderabile. Nur einige Physiker, welche die Gravitation gern als allgemeines, wesentliches Merkmal aller Materie retten wollten, blieben dabei, dass die Wärme doch eine gewisse Schwere noch haben könne, die nur so klein sei, dass man sie mit den vorhandenen Wagen nicht zu messen vermöge.

Doch konnte auch jene halbe Immaterialisation des Wärmestoffs denselben aus dem Kampfe ums Dasein nicht retten, vielmehr waren es gerade sehr bedeutende Physiker und Chemiker, welche die Existenz desselben sehr stark anzweifelten oder gar über denselben hinweg zu einer Undulationstheorie der Wärme übergingen. Die Erzeugung der Wärme durch Reiben hatte man früher für ein directes Auspressen des Wärmestoffs aus dem geriebenen Körper erklärt, und diese Erscheinung als einen Beweis für die Existenz des Wärmestoffs angesehen. Dann hatte man etwas feiner eine Verminderung der Wärmecapacität der Körper durch das Reiben behauptet und damit die Entstehung der Reibungswärme als das Freiwerden von Wärme aus chemischer Gebundenheit erklärt. Jetzt aber zeigte sich, dass

---

[1]) Jean Paul Marat (1743 bis 1793, von Charlotte Corday ermordet): Découvertes s. l. feu, l'électricité et la lumière, Paris 1779.

[2]) Philosophical Transactions, LXXXIX, 1799.

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

man durch Reiben zweier Körper aneinander unbestimmte, vielleicht unbegrenzte Mengen von Wärme erzeugen könnte, und damit waren die beiden Erklärungsarten jedenfalls unmöglich geworden.

Benjamin Thompson [1]) machte 1778 [2]) bei Versuchen über die Kraft des Schiesspulvers die merkwürdige Entdeckung, dass der Kanonenlauf sich mehr erwärmte, wenn das Geschütz ohne Kugel abgeschossen wurde, als wenn das mit der Kugel geschah, während man doch das Gegentheil hätte erwarten sollen, da im letzteren Falle das heisse Gas länger als im ersteren mit den Geschützwänden in Berührung war. Die Unvereinbarkeit dieser Erscheinung mit der Hypothese eines Wärmestoffes fiel ihm auf, doch setzte er wegen verschiedener Ursachen die Versuche damals nicht fort. Erst fast 20 Jahre später kam er zu neuen Versuchen, welche kräftiger und deutlicher gegen den Wärmestoff sprachen als die vorhergehenden [3]). Der nunmehrige Graf Rumford bemerkte bei der Ueberwachung des Kanonenbohrens in den Werkstätten des Militairzeughauses zu München mit Erstaunen die bedeutende Wärmemenge, welche ein metallenes Geschütz in kurzer Zeit während des Bohrens gewinnt. Er liess danach, zur genaueren Untersuchung, einen 9,8 Zoll langen und 7,75 Zoll dicken Cylinder aus Kanonenmetall drehen und 7,2 Zoll tief und 3,7 Zoll weit ausbohren. In die Oeffnung wurde ein stumpfer Stahlbohrer gebracht, der dieselbe fast ganz ausfüllte, und mit einer Kraft von ca. 10000 Pfund gegen den Cylinder gedrückt. Wenn dann der letztere mit einer Geschwindigkeit von 32 Umdrehungen in der Minute um seine Axe gedreht wurde, so stieg ein in den Cylinder seitlich eingelassenes Thermometer nach 30 Minuten oder 960 Umdrehungen von 60° auf 130° Fahrenheit; das Gewicht der abgeriebenen Bohrspähne betrug nur 837 Gran Apothekergewicht. Rumford meinte, nun sei die Gelegenheit gekommen, über die Existenz oder Nichtexistenz des feurigen Fluidums zu entscheiden. Woher stamme hier die bedeutende Wärmemenge? Werde sie durch die Metallspähne geliefert, welche

---

[1]) Benjamin Thompson wurde am 23. März 1753 in Rumford (jetzt Concord) in New-Hampshire von armen Eltern geboren. Seine wissenschaftliche Ausbildung erhielt er auf dem Collegium in Cambridge in Nordamerika. Im Unabhängigkeitskriege stand er auf Seiten der Engländer. Nach dem Friedensschlusse ging er nach England und wurde zum Sir erhoben, trat aber 1785 in die Dienste des Kurfürsten Karl Theodor von Pfalzbayern, der ihn 1790 zum Grafen von Rumford ernannte. Rumford machte sich um Bayern verdient durch Anlegung von Manufacturen, Einführung von Sparheizungen etc. 1799 starb Karl Theodor; in demselben Jahre ging Rumford nach London, wo er 1800 die Royal Institution mit gründen half. 1803 begab er sich nach Paris und vermählte sich dort mit der Wittwe von Lavoisier. Er starb am 21. August 1814 in Auteuil bei Paris.

[2]) Phil. Trans. LXXI, 1781.

[3]) Ibid. LXXXVIII, 1798: An Enquiry concerning the source of the heat which is excited by friction, gelesen am 25. Januar 1798. Essays, political, economical and philosophical, London 1796 bis 1803; deutsch, Weimar 1800 bis 1805.

von der festen Metallmasse losgetrennt wurden? Dann müsste nach den neueren Ansichten die Wärmecapacität derselben verringert worden sein und zwar so stark, dass man daraus die ganze erzeugte Wärmemenge erklären könne. Das schien aber, so weit die Versuche urtheilen liessen, durchaus nicht der Fall; dann blieb noch die Vermuthung, dass die entwickelte Wärme aus der Luft stamme, die zu dem Inneren des Cylinders bei dem Bohren Zutritt gehabt hatte. Um das zu entscheiden und die Luft vollständig abzuschliessen, wurde der ganze Apparat in einen Trog mit Wasser gebracht. Die Wassermenge betrug $2^1/_2$ Gallonen Weinmaass oder 18,77 Pfund. Jetzt stieg, zum grossen Erstaunen aller Anwesenden, die Temperatur von $60^0$ nach 1 Stunde auf $107^0$, nach 1 Stunde 30 Minuten auf $142^0$, nach 2 Stunden auf $170^0$, und nach 2 Stunden 30 Minuten kochte gar das Wasser. Damit hielt Rumford für bewiesen, dass von einem Körper Wärme in unbegrenzter Menge „ohne Unterbrechung oder Pause und ohne jegliches Zeichen von Abnahme und Erschöpfung" abgegeben werden könne. Dann aber dürfe man unmöglich diese Wärme als einen Stoff annehmen, vielmehr könne das, was so durch Bewegung immer unerschöpflich erzeugt werden könne, selbst nur Bewegung sein, und als Bewegungserscheinungen müsse man sonach alle Wärmeerscheinungen auffassen.

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

Rumford's Versuche wurden theilweise wiederholt, bestätigt und erweitert durch Humphry Davy[1]), dem nachmals so berühmten Chemiker, der schon in seiner Erstlingsschrift Essay on heat, light and the combinations of light[2]) mit aller Entschiedenheit sich der Annahme eines Wärmestoffes entgegensetzte.

Er rieb zwei an starken Eisenstäben befestigte Eisstücke aneinander und fand nicht bloss, dass das Eis durch die entstehende Wärme schmolz, sondern auch dass das gebildete Wasser eine höhere Temperatur erhielt, als die Lufttemperatur gerade betrug. Da aber das Wasser eine höhere Wärmecapacität hat als das Eis, so konnte die entstandene Wärme hier gewiss nicht aus einer Verminderung der Wärmecapacität durch das Reiben abgeleitet werden. Danach liess er in einem von Eis umgebenen luftleeren[3]) Recipienten der Luftpumpe durch ein Uhrwerk

---

[1]) Davy wurde am 17. December 1778 in Penzance in Cornwallis als Sohn eines armen Holzschnitzers geboren. 1795 kam er zu einem Chirurgen und Apotheker in die Lehre. 1798 wurde er Chemiker an der „Pneumatik Institution" des Dr. Beddoes in Clifton bei Bristol, 1801 Lehrer der Chemie an der Royal Institution in London. Nachdem er 1812 eine sehr reiche Dame geheirathet, gab er diese Stellung auf und lebte, vielfach auf Reisen, als Privatmann. Er starb am 29. Mai 1829 in Genf.

[2]) Enthalten in Contributions to physical and medical knowledge, collected by Th. Beddoes; Bristol 1799. Auch in The collected works of Sir Humphry Davy, vol. II.

[3]) Um einen vollkommen luftleeren Raum herzustellen, füllte Davy den Recipienten vor dem Auspumpen mit Kohlensäure und liess nach dem Aus-

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

ein metallenes Rad an einer Metallplatte reiben, dabei stieg die Temperatur soweit, dass Wachs geschmolzen wurde. Da hier der Apparat nicht mit Luft angefüllt und auch nicht von Luft umgeben, wohl aber in Eis eingehüllt war, so konnte Wärmestoff weder zugeleitet, noch durch chemische Processe frei geworden sein. Damit meinte Davy die Annahme eines Wärmestoffes unmöglich gemacht zu haben und ging dann einige Jahre später direct zu einer Vibrationstheorie der Wärme über[1]. „Da das Volumen jeder Materie durch Abkühlung verkleinert werden kann, so müssen augenscheinlich die Theilchen der Materie noch freien Raum zwischen sich haben; da ferner jeder Körper einem anderen von niederer Temperatur die Kraft der Ausdehnung mittheilen, d. h. seinen Theilen eine abstossende Bewegung geben kann, so ist die Folgerung höchst wahrscheinlich, dass seine eigenen Theile in Bewegung sind; da aber die Theile, so lange die Temperatur constant bleibt, ihren Ort nicht wechseln, so muss jene Bewegung, wenn sie existirt, eine Wellenbewegung oder eine Rotationsbewegung sein. . . . Es scheint, dass sich alle Erscheinungen der Wärme erklären lassen, wenn man annimmt, dass in einem festen Körper die Theilchen in beständig schwingender Bewegung sind, indem sich die Theilchen der wärmsten Körper mit der grössten Geschwindigkeit und durch den grössten Raum bewegen, dass bei tropfbaren und elastischen Flüssigkeiten ausser der schwingenden Bewegung, welche wohl bei den letzteren als die stärkste anzusehen ist, die Theilchen noch eine Bewegung um ihre eigenen Achsen mit verschiedener Geschwindigkeit ausführen, indem sich die Theilchen der elastischen Flüssigkeiten mit der grössten Schnelligkeit bewegen, und dass sich in ätherartigen Substanzen die Theilchen um ihre eigene Achse drehen und getrennt von einander, indem sie in geraden Linien den Raum durchfliegen. So kann man sich denken, dass die Temperatur abhängt von der Geschwindigkeit der Schwingungen, die Zunahme der Wärmecapacität von der Vergrösserung des Raumes, in welchem sich die Bewegung vollzieht, und die Temperaturabnahme während der Verwandlung von festen Körpern in Flüssigkeiten oder Gase lässt sich durch den Verlust an schwingender Bewegung erklären, in Folge der Drehung der Theilchen um ihre Achse, in dem Augenblicke, wo der Körper flüssig oder gasförmig wird, oder durch den Verlust an Schwingungsgeschwindigkeit in Folge der Bewegung der Theilchen durch einen grösseren Raum."

Auch Thomas Young, der Wiedererwecker der Undulationstheorie des Lichtes, ist natürlich ein unbedingter Anhänger der Bewegungstheorie

---

pumpen die letzten Reste derselben von kaustischem Kali absorbiren. Dies ist meines Wissens die erste Anwendung eines in neuester Zeit viel benutzten Mittels zur Herstellung stärkster Luftverdünnungen.

[1]) Elements of chemical philosophy, London 1812, p. 93 ff.

der Wärme. Schon in seiner Abhandlung On the theory of light and colours vom Jahre 1801 sagt er[1]: „Man war lange Zeit der festen Meinung, dass die Wärme in Schwingungen der Theile der Körper bestehe und durch den leeren Raum in Wellenbewegungen sich fortpflanze. Diese Meinung ist in der letzten Zeit fast vollständig verlassen worden. Graf Rumford und Mr. Davy sind fast die einzigen Physiker, welche sich zu ihren Gunsten erklärt haben, aber es scheint, dass sie ohne genügenden Grund verworfen worden ist und vielleicht bald ihre Popularität wieder gewinnen wird.“ In den Lectures on natural philosophy von 1807 aber geht er näher auf die Vertheidigung der Undulationstheorie der Wärme ein, um schliesslich zu der Ueberzeugung zu gelangen, dass Licht und Wärme aus ganz gleichartigen Schwingungen bestehen, die sich nur dadurch unterscheiden, dass die Wärmeschwingungen langsamer sind als die des Lichtes — und dass für die Undulationstheorie der Wärme noch stärkere Gründe sprechen als selbst für die Undulationstheorie des Lichtes[2]. Trotzdem fühlten sich die Physiker nicht veranlasst, diesen Behauptungen Young's eine grössere Beachtung zu schenken, als seinen Bemühungen um die Reform der Optik.

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

Rumford's und Davy's Versuche waren schwer mit der Annahme eines Wärmestoffes zu vereinigen, das entging keineswegs den damaligen Physikern. Wenn auch William Henry, Berthollet, J. T. Mayer u. A. sich noch bemühten, eine Ableitung jener Versuche mit der Stofftheorie zu Stande zu bringen, so fanden sie doch selbst bei ihren Gesinnungsgenossen keinen starken Glauben. Auf der anderen Seite konnte aber auch Rumford's Theorie nicht zur Anerkennung gelangen, weil man derselben nicht mit Unrecht entgegen hielt, dass nach ihr die so viel Aufsehen erregenden und theoretisch wie praktisch so viel wichtigeren Erscheinungen der latenten und der specifischen Wärme ebensowenig durch die Undulationstheorie zu erklären seien, als die Reibungswärme durch die Stofftheorie. Rumford hatte sich zwar mit der Ableitung der Schmelzwärme aus seiner Theorie beschäftigt. Er meinte, dass ein fester Körper flüssig werde, wenn die Bewegung der Partikeln desselben sich so beschleunige, dass diese Theilchen sich zu neuen, unabhängigen Systemen ordneten. Die additionelle Bewegung aber, welche sie dazu annehmen müssten, könne nicht verloren gehen, sondern müsse fortdauernd in der Flüssigkeit bleiben und wieder beim Festwerden der letzteren zum Vorschein kommen[3]. War aber diese

[1] Philosophical Transactions 1802; wieder abgedruckt in A course of lectures on natural philosophy and mechanical arts, London 1807, II, p. 623 bis 624.

[2] Lect. on nat. phil., London 1807, I, p. 651 bis 657.

[3] An inquiry concerning the nature of heat and the mode of its communication, Phil. Trans. 1804. Wie obige Aeusserung Rumford's, so zeigt auch die spätere Folgerung einer Erhaltung der Summe der lebendigen Kräfte im Universum für die Genialität ihres Autors; grössere

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

Erklärung der Schmelzwärme schon undeutlich und unbestimmt, so schien dieselbe einer Anwendung auf die specifische Wärme noch viel weniger fähig. Die Thatsache also, dass Wärme in ganz bestimmten, aber verschiedenen Verhältnissen von den verschiedenen Stoffen gebunden und auch nach beliebig langer Zeit in ganz gleichen Verhältnissen wieder frei gegeben werden kann, liess doch die meisten Physiker zu dem Wärmestoff zurückgehen und die Erzeugung der Wärme durch Reibung nur als einen noch nicht geklärten dunklen Punkt an dem sonst reinen Himmel betrachten. Schliesslich bemühte man sich, und zwar mit gutem Erfolge, den dunklen Punkt in der herrschenden Theorie ganz zu übersehen, und Biot hat in seinem Lehrbuche der Physik für die betreffenden Rumford'schen Versuche nur noch den einzigen, nach dem Vorhergehenden kaum begreiflichen Satz [1]: „Als Rumford . . . die Feilspähne untersuchte, welche aus dem Laufe der bronzenen Kanonen beim Bohren derselben hervorkommen, zeigten sie sich ihm im Besitz der nämlichen specifischen Wärme, als die Bronze selbst, obwohl sich während ihrer Bildung eine enorme Quantität Wärme entbunden hatte; woraus zu schliessen ist, dass diese Wärme bloss zwischen den festen Bronzetheilchen, d. h. zwischen den kleinen Gruppen dieser Theilchen, welche das Werkzeug losgetrennt hatte, vorhanden war."

Rumford suchte natürlich für seine Ansichten über die Wärmetheorie noch andere Stützen als die Reibungswärme und glaubte solche auch in der neuen Entdeckung der strahlenden Wärme wirklich zu finden. Doch hatte er hier noch weniger Erfolg als früher. Zu einer Zeit, wo man das Licht nur als eine Emanation begreifen konnte, hatte man keine Ursache, die Wärmestrahlen durch Undulationen zu erklären. Nach Scheele's Feststellung des Namens und des Begriffs der strahlenden Wärme beschäftigte sich zuerst Pictet [2]) eingehender mit dieser Erscheinung. Pictet [3]) stellte zwei Hohlspiegel aus polirtem Zinn von einem Fuss Durchmesser und 4,5 Zoll Brennweite in einem Abstand von 12 Fuss einander parallel auf. Wenn er dann in den Brennpunkt des einen Spiegels eine heisse, aber nicht glühende Kugel von 2 Zoll Durchmesser brachte, so stieg in dem Brenn-

---

Bedeutung für die weitere Entwickelung der Wissenschaft ist beiden bei ihrer Unentwickeltheit nicht zuzusprechen. Vergl. R. Rühlmann, Mechanische Wärmetheorie, Braunschweig 1885, II, S. 892 bis 893.

[1]) Biot, Lehrbuch der Experimentalphysik, übersetzt von Fechner, IV, S. 295; 1825.

[2]) Marc Auguste Pictet (23. Juli 1752 Genf — 19. April 1825 Genf) Schüler und Freund von Saussure, dem er 1786 als Professor an der Akademie in Genf folgte. Gab seit 1796 die Bibliothèque britannique heraus, deren Titel er 1816 in Bibliothèque universelle änderte.

[3]) Essai sur le feu, Genf 1790 (deutsch: Versuche über das Feuer, Tübingen 1790).

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

punkte des anderen Spiegels ein Thermometer auf 13,12° C., während ein anderes, gerade so weit von der Kugel entferntes, aber ausserhalb des Brennpunktes befindliches Thermometer auf 3,12° C. stehen blieb. War die Thermometerkugel mit Russ geschwärzt, so stieg das Thermometer viel höher als sonst; bei Anwendung von gläsernen statt der metallenen Spiegel aber zeigte sich gar keine Wirkung. Ein kalter Körper an Stelle des warmen gesetzt, kühlte ebenso das Thermometer ab, wie der andere es erwärmt hatte. Pictet versuchte auch die Geschwindigkeit der Wärmebewegung zu messen, indem er eine durchsichtige Glasplatte zwischen die Spiegel schob und schnell wieder wegzog, natürlich ohne Erfolg. Aus den Pictet'schen Versuchen leitete Prevost[1]) eine Theorie der Wärmestrahlung ab. Wie jeder leuchtende Körper Lichtstrahlen, so sendet jeder warme Körper Wärmestrahlen aus, die sich geradlinig durch den Raum bewegen, bis sie auf einen Körper treffen, der sie reflectirt, durchlässt oder absorbirt. Jeder Körper giebt also durch Strahlung fortwährend Wärme ab und empfängt durch Strahlung Wärme von den umgebenden Körpern. Das Verhältniss dieser Wärmemengen bestimmt die Temperatur des Körpers[2]).

In neuer und sehr interessanter Weise, mehr experimentell als theoretisch, bestimmte der berühmte Astronom Friedr. Wilh. Herschel das Verhältniss von Licht- und Wärmestrahlen[3]). Herschel stellte verschiedene sehr empfindliche Thermometer in jede der sieben, von Newton bestimmten, Farbenabtheilungen des Sonnenspectrums, und beobachtete, bis zu welchem Grade sich der Thermometerstand in jeder dieser Abtheilungen über den in der umgebenden Luft stattfindenden erhöhte. Er fand so, dass dieser Grad im Blau höher war, als im Violett, im Grün höher als im Blau u. s. f. bis zum Roth, in welchem sich eine höhere Temperatur als in allen anderen Farben zeigte. Aber, was die Hauptsache ist, auch hier hatte das Maximum der Temperatur noch nicht Statt, sondern es lag noch etwas über das äusserste Roth hinaus, ausserhalb des ganzen sichtbaren Theiles des Spectrums. Um dann die unsichtbaren Wärmestrahlen zu isoliren, liess er das prismatische Farbenbild der Sonne auf ein zur Hälfte mit Pappe bedecktes

---

[1]) Mém. sur l'équilibre du feu; Journal de physique XXXVIII, 1791. Mit Benutzung späterer Versuche Essai sur le calorique rayonnant, Genf 1809. Pierre Prevost (3. März 1751 Genf — 8. April 1839 Genf), 1780 bis 1784 Mitglied der Akademie und Prof. der Philosophie in Berlin, dann Prof. d. Phil. und Phys. an der Akademie in Genf.

[2]) Vergl. A. Riggenbach: Grundbegriffe der Wärmefortpflanzung. Wissenschaftl. Beilage zum Bericht über das Gymnasium, Basel 1884.

[3]) Investigation of the power of the prismatic colours to heat and illuminate objects; Phil. Trans. 1800. Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the Sun, ibid. Experiments on the solar and on the terrestrial rays that occasion heat, ibid. Auch Gilbert's Annalen VII, S. 137, X, S. 68, XII, S. 522.

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

Brennglas so fallen, dass das sichtbare Spectrum ganz auf die Pappe fiel und das rothe Ende desselben noch $^1/_{10}$ Zoll vom Rande der Pappe entfernt war; dann stieg das Thermometer im Brennpunkt (der rothen Strahlen) der Linse in einer Minute von 57° auf 102° F., während ein dicht dabei stehendes Thermometer den Stand von 57° behielt. Merkwürdigerweise erschien dabei auf der Thermometerkugel immer noch ein Schimmer rothen Lichtes, der erst aufhörte, wenn das rothe Ende des Spectrums $^1/_5$ Zoll vom Rande der Pappe abgerückt wurde; doch stieg auch dabei noch das Thermometer in einer Minute von 57 auf 78° F. Durch diese und andere Versuche glaubte Herschel nicht bloss die Existenz dunkler Wärmestrahlen constatirt, sondern auch bewiesen zu haben, dass dieselben ganz nach den Gesetzen der Lichtstrahlen gebrochen und reflectirt werden [1]).

Gegen Herschel insbesondere und gegen die Anhänger der strahlenden Wärme im Allgemeinen aber wandte sich in sehr scharfer Weise John Leslie. Er behauptete, dass Brechbarkeit mit Sichtbarkeit absolut verbunden, dass der Begriff unsichtbarer Wärmestrahlen eine contradictio in adjecto sei, und erklärte die Wirkungen, welche Herschel erhalten, durch directe Mittheilungswärme des sichtbaren Spectrums an benachbarte Theile, vielleicht auch an die Luft. Noch 1813 kämpfte er für seine Ansicht, indem er auseinandersetzte, dass, wenn der erwärmte Körper seine Wärme an die nächsten Luftschichten abgebe, diese sich dadurch ausdehnten und beim nachfolgenden Zusammenziehen ihre Wärme nun wieder an die nächstfolgenden Luftschichten mittheilten. So setze sich die Erwärmung von einem Körper zum andern durch Undulationen der Luft, aber nicht durch Strahlung fort [2]). Doch konnte er damit Niemand bekehren, nachdem Davy (wie ähnlich schon Andere vor ihm) gezeigt, dass in 120fach verdünnter Luft die Strahlung dreimal stär-

---

[1]) Friedr. Wilh. Herschel wurde am 15. Nov. 1738 in Hannover geboren, ging 1757 als Musiker nach England; 1765 Organist in Halifax, 1766 in Bath. In Halifax begann er das akustische Werk von R. Smith zu studiren und trieb zu diesem Zwecke auch Mathematik. In Bath beschäftigte er sich mit der Construction von Teleskopen, das erste wurde 1774 fertig. Am 13. März 1781 entdeckte er den Uranus und wurde danach Privatastronom des Königs Georg III. Seine astronomischen Arbeiten behandeln weiter die physische Beschaffenheit des Mars, die Doppelsterne, die Nebelflecke und Sternhaufen, die Monde, Ringe und Streifen des Saturn, den Uranus und seine Monde, die Lichtstärken der Sterne, die physische Beschaffenheit der Sonne etc. Ausser den physikalischen Abhandlungen von 1800 über Licht- und Wärmestrahlen veröffentlichte er von 1807 bis 1810 Abhandlungen über die Newton'schen Farbenringe und ähnliche Erscheinungen. Er starb am 25. August 1822 in Slough bei Windsor.

[2]) Nicholson's Journ. 1800: Descript. of an hygrometer a. photom.; Exp. on light a. heat. Inquiry into the nat. of heat, London 1804. A short acc. of Exp. a. Instr. dep. on the Relation of Air to heat and moisture, Edinburgh 1813. Theilweise auch in Gilbert's Ann. V, X, XV.

ker ist als in atmosphärischer Luft, und nachdem Ritter im Sonnenlicht ausser den Wärmestrahlen noch andere dunkle, chemisch wirkende Strahlen aus der Einwirkung des Sonnenspectrums auf salzsaures Silber sicher nachgewiesen hatte [1]). Trotzdem sind Leslie's Arbeiten über strahlende Wärme sehr werthvoll, weil sie zuerst genauere Nachweise über die Mengen der ausgestrahlten Wärme gaben. Leslie benutzte bei seinen Versuchen sein Differentialthermometer und den nach ihm benannten Würfel. Der letztere war ein hohler Würfel von Messing- oder Kupferblech von 4 bis 6 Zoll Seite. Von seinen vier Seitenflächen, die aussen möglichst gleich hergestellt wurden, blieb die eine meist polirt, die andere wurde mit Lampenruss, die dritte mit Schreibpapier, die vierte mit Crownglas bedeckt. In der oberen Fläche befand sich eine Oeffnung mit konischem Rohre, durch welches man warmes oder kaltes Wasser eingiessen und ein Thermometer einführen konnte. Mittelst dieses Würfels, dem er sein Thermometer in bestimmter Entfernung gegenüberstellte, bestimmte dann Leslie das Ausstrahlungsvermögen von vielen Substanzen und gab seine Resultate in folgender Tabelle:

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

| | |
|---|---|
| Russ | 100 |
| Wasser | 100 |
| Schreibpapier | 98 |
| Crownglas | 90 |
| Chinesische Tusche | 88 |
| Eis | 85 |
| Quecksilber | 20 |
| Glänzendes Blei | 19 |
| Polirtes Eisen | 15 |
| Zinn, Silber, Kupfer, Gold | 12 [2]). |

Rumford's Versuche [3]), die er im Jahre 1803 begann und deren Resultate er am 25. Juni 1804 dem französischen Institut mittheilte, waren den vorigen ganz ähnlich. Er füllte blanke Metallcylinder mit warmem oder kaltem Wasser, bekleidete die äusseren Wände derselben mit Russ, Silberschaum etc. und betrachtete dann die Wirkungen derselben auf das von ihm erfundene Thermoskop. Er fand, wie Leslie, dass die-

[1]) Gilbert's Ann. VII, S. 527, 1801; XII, S. 409, 1802. Gleichzeitig mit Ritter entdeckte auch Wollaston die dunklen, chemischen Strahlen; Gilb. Ann. XXXIX, S. 291.

[2]) John Leslie (16. April 1766 Dorf Largo, Fifeshire in Schottland — 3. Nov. 1832 Coates bei Largo), erwarb sich durch sein Talent für Geometrie die Gunst von Robison, Playfair und Stewart; studirte in Edinburgh, beschäftigte sich danach in London mit schriftstellerischen Arbeiten und Uebersetzungen; hierauf als Reisebegleiter in Nordamerika und Europa. 1804 Prof. der Mathematik und 1819 auch der Physik in Edinburgh.

[3]) Mémoires sur la chaleur, Paris 1804. Auch An inquiry concerning the nature of heat and the mode of its communication. Phil. Trans. 1804. Auszug in Gilbert's Ann. XVII, S. 33 u. 213; 1804.

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

jenigen Oberflächen, welche die Wärme am besten reflectiren, selbst am wenigsten Wärme aussenden. Seine experimentellen Resultate erkannte man auch wie die von Leslie als werthvoll an, seinem Hinweis auf die Undulationstheorie aber folgte man hier ebensowenig als früher.

Leslie's Instrument zum Messen der strahlenden Wärme, das Differentialthermometer, besteht aus zwei mit Luft gefüllten, gleich grossen Glaskugeln, welche durch eine zweimal gebogene Glasröhre verbunden sind. Diese Glasröhre enthält im unteren Theile eine gefärbte Flüssigkeit (Schwefelsäure mit Carmin), deren Bewegungen die Ausdehnung oder Contraction der Luft in den Kugeln anzeigen. Der Durchmesser der Kugel schwankte bei den verschiedenen Instrumenten zwischen 4 bis 7 par. Linien, die Höhe der verticalen Schenkel der Glasröhre zwischen 3 und 6 Zoll, die Länge des horizontalen Theiles war geringer als diese Höhe.

Rumford's Thermoskop wich von dem Differentialthermometer fast nur in den Verhältnissen der einzelnen Theile ab, wobei man allerdings zugeben muss, dass die Abweichungen Verbesserungen waren. Der horizontale Theil der Röhre war bedeutend länger als der verticale und enthielt als Index nur einen Tropfen gefärbten Weingeistes. Die Durchmesser der beiden Kugeln waren bedeutend grösser als bei dem Leslie'schen Instrument, und endlich stand noch zwischen den beiden Kugeln ein die Wärme nicht durchlassender Schirm von Goldpapier. Die Construction des Differentialthermometers fällt nach Leslie selbst in die Jahre 1797 bis 1799, die Beschreibung desselben erschien 1800 im dritten Bande von Nicholson's Journal. Doch haben wir schon früher bemerkt, dass Sturm in seinem Collegium experimentale ein im Wesentlichen ganz gleiches Instrument angegeben, und Leslie kann dieses Werk und somit auch diese Beschreibung wohl gekannt haben [1]). Rumford beschrieb sein Thermoskop erst im Jahre 1804 in derselben Schrift, in welcher er seine Untersuchungen über strahlende Wärme veröffentlichte; doch wurde auch das Instrument Leslie's erst in diesem Jahre durch die Schrift Inquiry concerning the nature of heat in weiteren Kreisen bekannt. Für die Beobachtung der strahlenden Wärme zeigten sich allerdings die beiden Instrumente besonders geeignet, denn sie werden nicht, wie die gewöhnlichen Thermometer, durch die Temperatur der Luft, die auf beide Kugeln gleichmässig wirkt, sondern nur durch die Wärmestrahlen, die auf eine der Kugeln fallen, beeinflusst.

Indessen hatte Leslie wenigstens einen noch viel allgemeineren Gebrauch für sein Instrument im Auge; er empfahl dasselbe, wie als Thermometer, so als Aethrioskop (zum Messen der Wärme- oder Kältestrahlung des Himmelsraumes), als Photometer und als Hygrometer. Wegen

---

[1]) Vergl. Poggendorff, Geschichte der Physik, S. 440.

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

der grossen Empfindlichkeit des Instrumentes erregte dasselbe auch bedeutende Erwartungen und hatte längere Zeit den Beifall der damaligen Physiker. Später zeigte sich allmählich, dass dasselbe für keinen der angegebenen Zwecke wirklich brauchbar sei. Erstens wird die strahlende Wärme beim Durchgange durch das Glas nicht nur geschwächt, sondern auch qualitativ verändert, zweitens hängen die Angaben desselben nicht nur von der Ausdehnung der Luft, sondern auch von der der Flüssigkeit in demselben ab, so dass diese Angaben keineswegs den Temperaturunterschieden proportional sind, und schliesslich gelang es trotz aller Bemühungen nicht, die Angaben verschiedener Instrumente auch nur annähernd vergleichbar zu machen. Immerhin behielt man dieselben in Ermangelung von Besserem zur Messung der strahlenden Wärme noch längere Zeit bis zur Construction der Thermosäule bei. Als Photometer hat noch 1825 Ritchie das Instrument zu verbessern gesucht. Als Hygrometer ist es weniger durch sich selbst, als durch den Plan seiner Anwendung nützlich geworden. Saussure hatte bemerkt, dass eine bestimmte Wasseroberfläche auf trockenem Lande mehr ausdunstet, als wenn sie mitten auf einen See gebracht wird, und dass also die Grösse der Verdunstung von dem augenblicklichen Feuchtigkeitsgehalte der Atmosphäre abhängt[1]). Leslie kehrte den Schluss um; er benetzte die eine Kugel seines Differentialthermometers mit Wasser und schloss dann aus der Verdunstungskälte, welche das Instrument anzeigte, auf die Grösse der atmosphärischen Feuchtigkeit. Da es aber nicht gelang, die Scala des Differentialthermometers mit der des gewöhnlichen Thermometers in genügende Uebereinstimmung zu bringen, so versuchte Lüdicke schon 1802 (Gilbert's Ann. X, S. 110) den Leslie'schen Gedanken auf bessere Weise zur Ausführung zu bringen. Zu dem Zwecke befestigte er zwei Thermometer auf einer Scala; die Röhre des einen war so umgebogen, dass die Kugel desselben unter der Kugel des andern lag; die erstere hatte oben eine Vertiefung, in die ein Tropfen der Flüssigkeit gegossen wurde, deren Verdunstung die Kälte erzeugte. Indessen blieb auch dieser Vorschlag unbeachtet, und noch lange benutzte man als Hygrometer nur die Instrumente von Deluc oder Saussure, die beide bei geschickter Construction immer noch eine bessere Uebereinstimmung zeigten als alle andern. Deluc nahm nach mancherlei verfehlten Versuchen als hygroskopische Substanz einen 8 Zoll langen und 0,5 Linien breiten Streifen Fischbein, der aber nicht den Längsfasern nach, sondern quer zu denselben abgeschnitten war. Den Scalenpunkt, der der grössten Feuchtigkeit entsprach, bestimmte er durch Eintauchen des Instruments in Wasser, einen zweiten festen Punkt konnte er anfangs nicht finden, weil er sein Instrument nicht dem Feuer auszusetzen wagte. Später bestimmte Deluc den Punkt grösster Trockenheit durch tagelanges Aufhängen des

[1]) Versuch über die Hygrometrie, Leipzig 1784, S. 282 bis 283.

Wärme-theorie, c. 1780 bis c. 1800.

Instruments in einem zinnernen Kasten, der mit gelöschtem Kalk zum Theil angefüllt war. Die Scala zwischen diesen beiden Punkten theilte er dann in 100 Grade. Das erste unvollkommene Fischbeinhygrometer mit einem festen Scalenpunkt etc. übergab er im Jahre 1781 der pariser Akademie, das vollkommenere Instrument verfertigte er bald danach [1]).

Saussure [2]) wählte als hygrometrische Substanz ein weiches, blondes, aber nicht krauses Menschenhaar, welches zur Auflösung des Fettes 30 Minuten in einer Sodalösung und dann noch einige Zeit in reinem Wasser gekocht worden war. Den Punkt grösster Feuchtigkeit auf seiner Scala bestimmte er dadurch, dass er das Instrument unter eine gläserne Glocke stellte, die überall mit Feuchtigkeit bestrichen und auf einen Teller mit Wasser gesetzt war. Zeigte der Zeiger nach 5 bis 6 Stunden keinen festen Stand, so war das Haar unbrauchbar, ebenso auch, wenn die Vorwärtsbewegung einmal durch eine Rückwärtsbewegung unterbrochen wurde. Zur Bestimmung des Punktes grösster Trockenheit wurde das Instrument unter eine trockene Glocke gebracht, unter welche man noch ein fast glühendes Eisenblech gebracht hatte und die dann durch Quecksilber von der äusseren Luft abgeschlossen war [3]).

Saussure's Hygrometer fand viele Anhänger und häufige Anwendung, aber auch heftige Gegner. Chiminello, Astronom zu Padua, nahm einen mit Quecksilber gefüllten, dann geschabten Federkiel als hygrometrische Substanz und erhielt dadurch den Preis der kurpfälzischen Akademie der Wissenschaften zu Mannheim; er brachte sowohl Einwürfe gegen den Gang, wie gegen die festen Punkte des Hygrometers von Saussure. Giambattista da San Martino schlug für das Hygrometer als billigere und bessere Substanz statt des Haares Goldschlägerhaut vor. Deluc behauptete endlich, dass die Punkte grösster Feuchtigkeit und grösster Trockenheit nur wie bei ihm gefunden werden könnten und dass die Haare, wie alle Körper, welche längs der Fibern geschnitten sind, in ihrem Gange die grösste Unregelmässigkeit zeigten. Saussure vertheidigte sich gegen alle Gegner, indem er behauptete, dieselben hätten zu ihren Versuchshygrometern untaugliche Haare gehabt. Speciell gegen das Deluc'sche Hygrometer machte er geltend, dass Fischbein seiner Fettigkeit wegen die Feuchtigkeit der Luft nicht gut aufnehme und dass die Luft oft schon mit Feuchtigkeit gesättigt sei, wenn dieses Hygrometer erst 80$^0$ zeige. Es wurden danach auch noch eine

---

[1]) Nouv. Idées sur la Météorologie, Paris 1787. A second paper on hygrometrie, Phil. Trans. LXXXI, 1791.

[2]) Horace Benedict de Saussure (17. Februar 1740 Conches bei Genf — 22. Januar 1799 Genf). Von 1762 bis 1784 Professor der Philosophie an der Akademie in Genf, machte von 1758 bis 1779 für geologische und meteorologische Zwecke viele Reisen in den Alpen, im Jura und anderen Theilen Europas. (Voyages dans les Alpes, Genf 1779 bis 1796; deutsch 1781 bis 1796).

[3]) Essai sur l'hygrometrie, Neufchâtel 1783; in deutscher Uebersetzung Leipzig 1784.

Menge von Hygrometern mit allen möglichen hygroskopischen Substanzen, wie seidenen und hänfenen Schnüren, Holzfasern, Froschhaut, Rattenblase u. s. w., construirt, doch übertraf keines derselben die Deluc'- oder Saussure'schen an Genauigkeit, und alle litten sie an der ungleichen Ausdehnung der gebrauchten Substanzen und an der Unsicherheit der festen Punkte noch mehr als die beiden berühmtesten Instrumente. In der Folge übrigens trat auch das Fischbeinhygrometer noch gegen das Haarhygrometer zurück. Biot sagt in seiner Experimentalphysik [1]: „Saussure hat sich des so zubereiteten Haares zur Verfertigung des Hygrometers bedient, welches seinen Namen trägt, und welches in die Untersuchungen dieser Art eine bis dahin unerreichbare Genauigkeit gebracht hat" und übergeht alle anderen Hygrometer mit Stillschweigen.

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

Den Arbeiten für die Verfertigung vergleichbarer Hygrometer schliessen sich die Bemühungen um die Construction von Thermometrographen oder von Maximal- und Minimalthermometern an. Das erste dieser Instrumente hat wohl Lord Charles Cavendish (der Vater des berühmten Chemikers) in den Phil. Trans. für 1757 beschrieben. Das Maximumthermometer war ein gewöhnliches Quecksilberthermometer, das man aber über dem Quecksilber noch ganz mit Weingeist angefüllt hatte. Die Röhre desselben war in eine feine Spitze ausgezogen und diese in eine luftleere Kugel eingekittet. Stieg die Temperatur, so floss Weingeist aus der Röhre in die Kugel, ohne beim Sinken der Temperatur wieder aus der Kugel zurücktreten zu können. Aus der Menge des in der Röhre zurückgebliebenen Weingeistes konnte man auf das erreichte Maximum der Temperatur schliessen. Das Minimumthermometer war etwas complicirter, aber nach demselben Princip eingerichtet. Das Instrument functionirte richtig, nur machte die Berechnung der Temperatur Schwierigkeiten wegen der ungleichen Flüssigkeiten im Thermometer; es wurde darum direct durch die beiden folgenden Instrumente verdrängt, wenn auch der Grundgedanke desselben später vielfach wieder benutzt worden ist. Diese beiden Instrumente aber, der Thermometrograph von Six und die Maximal- und Minimalthermometer von Rutherford, sind so allgemein bekannt und ausserdem in jedem Lehrbuche der Physik so deutlich beschrieben, dass wir uns ein näheres Eingehen auf ihre Einrichtung hier ersparen können. Six machte sein Thermometer durch eine Abhandlung in den Philosophical Transactions für 1782 und später auch in einer besonderen Schrift bekannt. Rutherford beschrieb das seinige in den Edinburgh Philosophical Transactions vom Jahre 1794 [2]).

Der Kampf um die Schwere und Leichtigkeit der Wärme und der Streit über das Verdampfen des Wassers und das Aufsteigen der Wol-

---

[1]) Lehrbuch der Experimentalphysik, Leipzig 1825, I, S. 282.

[2]) James Six, Mitglied der Royal Society, starb 1793. Daniel Rutherford (1749 bis 1819), war praktischer Arzt und Professor der Botanik in Edinburgh.

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

ken in der Luft führten zu einer Entdeckung, die der Wärmetheorie fern zu liegen schien und doch, obgleich schon viel versucht, erst mit Hülfe der Wärme gemacht wurde, das ist die Entdeckung des Luftballons. Die weitere Entwickelung dieser Maschine ist so sehr Sache der Technik, auch in viel verbreiteten Werken so ausführlich beschrieben, dass ich nur auf die Vorgeschichte derselben, wie auf einige dabei sich anschliessende Betrachtungen, etwas näher eingehen will.

Der Wunsch des Menschen, über die Gefahren und Leiden des menschlichen Treibens von der Oberfläche der Erde ins reine Blau des Aethers sich zu erheben, ungehindert von Bergen und Thälern, von Flüssen und Meeren und holprigen Strassen durch die Lüfte zu segeln, ist wohl so alt, wie das Menschengeschlecht selbst. Das nächstliegende Beispiel für solche Fahrten bot natürlich der Vogelflug, und von Dädalus bis auf unsere Zeiten fehlt es nicht an Nachrichten von Männern, die mit Flugapparaten, mehr oder weniger ähnlich den Vogelflügeln, die Luftschifffahrt betrieben haben sollen. Leider werden dabei mehr die Fahrten selbst, als die Maschinen, welche bei denselben dienten, beschrieben. Am besten bekannt ist die Flugmaschine des Wiener Uhrmachers Jakob Degen, der dieselbe 1808 in einem eigenen Werke beschrieb [1]). Der Apparat enthielt zwei Flügel, deren Gerippe aus Bambusrohr, deren Oberfläche aus gefirnisstem Papier bestand, die Länge eines jeden betrug 10 Fuss 4 Zoll, die grösste Breite 9 Fuss. In jedem Flügel befanden sich 3500 papierne Klappen, die, an Seidenfäden befestigt, nach unten sich öffneten, um die Luft beim Aufwärtsbewegen der Flügel durchzulassen. Alles war durch seidene Schnüre, die an einem aufrechten Stabe sich vereinigten, hinreichend gespannt und befestigt. Die Ebene der Flügel befand sich etwa in der Höhe des Halses des aufrecht stehenden Fliegenden und das Gestell war fest mit seinem Körper verbunden. Er bewegte die Flügel, indem er wie zum Sprunge ansetzend, in einem Rahmen niedertrat. Bei Versuchen in der kaiserlichen Reitschule in Wien im Jahre 1808 erleichterte Degen durch ein Gegengewicht, welches an einer Rolle von der Decke herabhing, seine Last um 75 Pfund und vermochte sich dann durch 34 Flügelschläge in einer halben Minute auf eine Höhe von 50 Fuss zu heben. Er hat später das Gegengewicht durch einen kleinen Ballon ersetzt, der ihn eben noch tragen konnte und dann auch verschiedene Bewegungen frei in der Luft ausgeführt, ja er soll es fertig gebracht haben, nach dem Loslösen von seinem Ballon, während seines langsamen Fallens durch einige Flügelschläge um ein Geringes sich wieder zu erheben [2]). Durch eigene Kraft

---

[1]) Beschreibung einer Flugmaschine von Jacob Degen, bürgerlichem Uhrmacher, Wien 1808; Nachrichten über die Maschine auch in Gilbert's Annalen XXX, S. 1 und XXXI, S. 192.

[2]) Degen gab im Prater am 13. und am 15. November des Jahres 1808 zwei Vorstellungen mit seiner Flugmaschine. „Er konnte sich nach Willkür senken, wenn er ohne allen Schlag seine Flügel wagerecht ausgespannt hielt.

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

allein aber hat er sich und seine Maschine auf längere Zeit in der Luft jedenfalls nicht zu halten vermocht. Es ist allerdings keineswegs sicher erprobt, wie viel der Mensch unter günstigen Umständen zu seiner Hebung in der Luft Arbeit leisten könnte; einzelne Versuche Degen's lassen es ja möglich erscheinen, dass er bei momentaner Anspannung eine geringe Hebung in der Luft erzielen könnte; aber man braucht doch nur die Leistungsfähigkeit des Menschen beim Schwimmen oder Klettern zu bedenken und hinzuzunehmen, dass er durch keine Maschine an Kraft gewinnen kann, um einzusehen, dass der Mensch durch seine Kraft allein sich nicht in der Luft zu erheben vermag. Der Physiker Babinet[1]) sagt: „Wenn die Kraft eines Pferdes hinreicht, einen Mann von mittlerem Gewicht in einer Secunde 1 m hoch zu heben, so wird dagegen die um das Vier- oder Fünffache geringere Kraft des Menschen nicht ausreichen, sein eigenes Gewicht in einer Secunde um mehr als $^1/_4$ oder $^1/_5$ m zu heben. Nun aber sinkt unser Körper in derselben Zeit zufolge des Gesetzes der Schwere um 5 m, und es bedürfte deshalb für uns einer 20- oder 25 mal grösseren Kraft, wenn wir im Stande sein sollten, uns in der Luft zu erhalten. Deshalb ist es mathematisch unmöglich, dass der Mensch jemals fliege, und er müsste sich zu diesem Zwecke andere Kräfte dienstbar machen". Danach bleibt ihm nichts anderes übrig, als sich mit Körpern zu verbinden, die leichter sind, als die atmosphärische Luft, und ihn in dieser tragen. Als solche Körper aber könnten nur Hohlkörper dienen, die entweder ganz luftleer, oder mit Stoffen, leichter als die Luft, gefüllt wären. An das erstere, was ja theoretisch das vortheilhafteste wäre, hat man sogleich gedacht, als man nur überhaupt einen luftleeren Raum darzustellen gelernt hatte. Schon im Jahre 1670, also kaum 20 Jahre nach Erfindung der Luftpumpe, schlug der Jesuit Francesco de Lana[2]) vor, vier grosse sehr dünnwandige kupferne Kugeln luftleer zu machen und daran ein Luftschiff zu befestigen. Der Vorschlag aber wurde gewiss nicht ausgeführt, denn es leuchtet ja augenblicklich ein, dass weder Kupfer noch irgend ein anderer der uns bekannten Stoffe bei genügender Leichtigkeit Festigkeit genug besitzen könnte, um dem Druck der äusseren Luft zu widerstehen. Joseph Galien machte darum in der Schrift (L'Art de naviguer dans les airs, Avignon 1755) den anderen Vorschlag, grosse Hohlkugeln mit einer leichteren Gasart, vielleicht mit atmosphärischer Luft, aus den höheren Regionen zu füllen. Das letztere war lächerlich, das erstere aber, was damals auch

---

Das Sinken geschah so langsam, dass keinen Zuseher dabei eine Furcht überfiel, und dass er sogar etwas ausruhen konnte, um sich mittelst neuer Flügelschläge wieder zu erheben. Der Künstler konnte sich ferner in der Luft umwenden, wenn er eine der Handhaben mehr vorwärts, die andere mehr rückwärts ergriff." Gilbert's Ann. XXXI, S. 200.

[1]) Luftreisen von J. Glaisher etc., Leipzig 1872, S. 162.

[2]) Prodromo all' arte maestra, Brescia 1670.

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

noch unmöglich schien, wurde bald ausgeführt. Im Jahre 1766 entdeckte Henry Cavendish eine Luftart, die leichter war als atmosphärische Luft, und schon 1768 machte der berühmte schottische Chemiker Black darauf aufmerksam, dass dünne Hohlkugeln, welche mit dieser leichten brennbaren Luft, dem Wasserstoff, gefüllt wären, in der Luft emporsteigen müssten. 1782 führte Cavallo, nachdem er mit Ballons aus Papier oder aus Schweinsblase vergeblich experimentirt hatte, den Versuch mit Seifenblasen wirklich durch. Auch die Gebrüder Montgolfier [1]) sollen zuerst mit Wasserstoff, aber vergeblich, gearbeitet haben, weil die gebrauchten Hüllen nicht dicht genug waren. Sie kamen deshalb von diesem Gedanken ab und beschlossen nun, die Wolken in ihrem Steigen nachzuahmen. Nach mancherlei Versuchen fertigten sie cylindrische oder prismatische Körper mit doppelter Hülle aus Leinwand und Papier, die unten offen und oben geschlossen waren. An dem Rahmen der Oeffnung waren diagonal Stäbe angebracht, die auf ihrem Kreuzungspunkte eine Pfanne trugen. Indem sie auf dieser Pfanne ein Gemisch von Stroh, Papier und Wolle anzündeten, brachten sie am 5. Juni 1783 [2]) von dem Marktplatze zu Annonay aus eine Maschine zum Steigen, welche 35 Fuss im Durchmesser hatte, 450 Pfund wog und noch 400 Pfund Last trug. Sie stieg ungefähr 1000 Fuss hoch und fiel 12 000 Schritte vom Orte ihres Aufsteigens herab. Die Nachricht von diesem gelungenen Experiment verbreitete sich mit grosser Schnelligkeit. Die Pariser Akademie, an welche auch ein Protokoll über die Vorgänge abgesandt worden war, setzte eine Commission zur Beurtheilung der neuen Entdeckung nieder, aber ehe diese noch zur eigentlichen Arbeit gekommen, hatte schon Barthélemy Faujas de St. Fond [3]) eine bedeutende Summe Geld für Versuche gesammelt, und der mit der Direction derselben beauftragte Jacques Alexandre César Charles [4]) konnte schon am 27. August 1783 auf dem Marsfelde zu Paris ebenfalls einen Ballon steigen lassen. Dieser Ballon aber war keineswegs eine Nachahmung des Montgolfier'schen, sondern eine ganz neue Erfindung. Trotz der vielen Nachrichten über die Montgolfier'schen Maschinen war man doch über die innere Einrichtung noch wenig unterrichtet, und das war hier der Sache zum Heil. Denn die Maschine des

---

[1]) Joseph Michel Montgolfier (1740 — 1810) Papierfabrikant in Annonay, dann Administrator des Conservatoire des arts-et-métiers in Paris. Jacques Étienne Montgolfier (1745 — 1799), ursprünglich Architect, dann Mitinhaber der Papierfabrik.

[2]) Noch im Jahre 1783 erschienen: Joseph et Étienne Montgolfier, Discours sur l'aërostat, Paris 1783; Faujas de Saint-Fond, Description des expériences aërostatiques de M. M. Montgolfier, 2 vol., Paris 1783.

[3]) 1741 bis 1819, um jene Zeit adjoint naturaliste am Museum in Paris und königl. Commissär der Bergwerke.

[4]) 1746 bis 1823, damals Professor der Physik am Conservatoire des arts-et-métiers.

Charles wurde nicht bloss anders, sondern auch besser als die der Gebrüder Montgolfier. Die Montgolfièren waren zuerst cylindrisch geformt, die Charlièren aber ziemlich kugelig. Die Montgolfièren bestanden aus Leinwand, die mit Papier gefüttert, und deren einzelne Stücke nur durch Knöpfe aneinander befestigt, also nicht luftdicht geschlossen waren; die Charlièren aber wurden aus Taffet gefertigt, der mit einem von Charles erfundenen Firniss (Gummi elasticum in Terpentinöl gelöst) überzogen und so luftdicht gemacht war. Endlich das Wichtigste, die Montgolfiers hatten ihren Ballon durch Verbrennen eines Gemisches von Stroh und Papier erhitzt, aber daraus ein Geheimniss gemacht und vermuthen lassen, dass sie ein besonderes Gas zum Füllen verwandt hätten. Charles griff darum nach dem naheliegenden Mittel und füllte seinen Ballon mit Wasserstoffgas, für dessen Bereitung im Grossen er allerdings noch manche Schwierigkeiten zu überwinden hatte. Der Durchmesser seines Ballons war 12 Fuss 2 Zoll, er wog 25 Pfund, stieg in 2 Minuten 488 Toisen hoch, verschwand in den Wolken und fiel bei dem Dorfe Gonesse, 5 Lieues von Paris, in Folge eines Risses, den er wohl wegen zu starker Füllung erhalten, nieder. Die Bauern des Dorfes schlugen, nachdem sie ihre Furcht überwunden, das vermeintliche vor ihnen sich wälzende Ungethüm mit Dreschflegeln, Heugabeln so kaput, dass dem zu spät herbeieilenden Charles nur einige Lumpen seines ersten Ballons blieben.

Wärmetheorie, c. 1780 bis c. 1800.

Nachdem schon die hochgehenden Wogen des Enthusiasmus, welchen die Entdeckungen der Elektrisirmaschine, der Verstärkungsflasche u. s. w. hervorgerufen, sich ziemlich gelegt und die hoch gespannten Erwartungen, welche man an jene Entdeckungen geknüpft, sich sehr vermindert hatten, trat plötzlich, ohne vorherige Anzeichen, ohne sichtbar wirkende Ursachen eine neue elektrische Entdeckung auf, die stärker als alle früheren die gesammte Physik beeinflussen sollte. Eine Entdeckung, deren Urheber man in einziger Weise dadurch ehrte, dass man der auf ihr sich aufbauenden neuen physikalischen Disciplin den Namen **Galvanismus** beilegte.

Thierische Elektricität, c. 1790 bis c. 1800.

Die erste Nachricht von dieser Entdeckung gab Galvani[1]) selbst in der kleinen Schrift De viribus electricitatis in motu musculari commentarius (Comment. Bonon. VII, 1791)[2]). Manche Physiker

[1]) Luigi Galvani, am 9. September 1737 in Bologna geboren, war seit 1762 Professor der Medicin in seiner Vaterstadt; er beschäftigte sich vorzüglich mit vergleichender Anatomie und Physiologie. Als er 1797 der neu errichteten cisalpinischen Republik den Eid der Treue verweigerte, wurde er seiner Stelle entsetzt. Kurz vor seinem Tode wurde ihm dieselbe wieder angeboten. Er starb am 4. December 1798 in Bologna.

[2]) Aloysi Galvani, Abhandlung über die Kräfte der thierischen Elektricität auf die Bewegung der Muskeln, übersetzt von Dr. Joh. Mayer, Prag. 1793.

Thierische Elektricität, c. 1790 bis c. 1800.

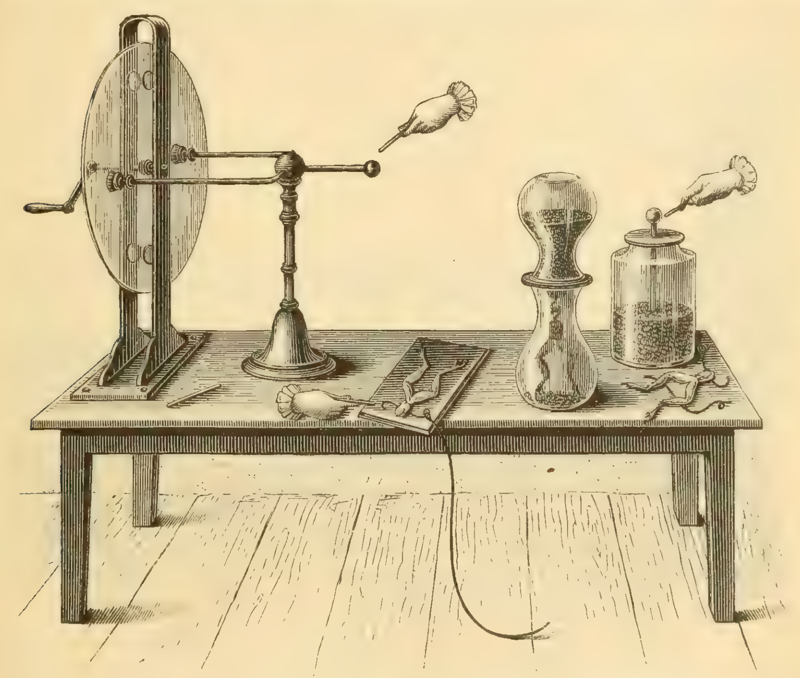
setzen den Anfang der diesbezüglichen Arbeiten Galvani's schon in das Jahr 1780, die folgenden Worte aber, mit denen derselbe die angeführte Schrift beginnt, lassen für diese Meinung wenig Wahrscheinlichkeit übrig[1]). „Mein Wunsch“, sagt Galvani, „war es..., wenngleich kein vollkommenes, kein vollendetes Werk . . ., doch kein rohes, nur kaum angefangenes ans Licht treten zu lassen. Da ich aber wahrnahm, dass es an Zeit, Musse, selbst an Geisteskräften, um es auszuführen, gebricht, so zog ich den Nutzen der Sache selbst diesem meinem billigsten Wunsche vor.“ Die Veranlassung zu seiner Entdeckung beschreibt er folgendermaassen: „Ich zerschnitt einen Frosch . . ., legte ihn, ohne etwas zu vermuthen, auf die Tafel, worauf die Elektrisirmaschine stand, die gänzlich vom Conductor getrennt und ziemlich weit davon entfernt war. Als aber einer meiner Zuhörer die Spitze des Messers von ungefähr ein wenig an die inneren Schenkelnerven brachte, so wurden die Muskeln aller Glieder sogleich zusammengezogen, als ob sie von heftigen Convulsionen ergriffen würden. Ein Anderer von den Gegenwärtigen glaubte zu bemerken, es geschehe nur zur Zeit, wenn der Conductor einen Funken gebe. Er bewunderte die Neuheit der Sache und machte mich, der ich eben etwas ganz anderes vor hatte, aufmerksam darauf. Ich wurde auch sogleich von der Begierde, das Nämliche zu erfahren und das Verborgene davon zu erforschen, hingerissen.“ Der erwähnte „Andere von den Gegenwärtigen“ hat den Leuten später viel Kopfzerbrechens verursacht; in Bologna behauptete man, es sei die eigene Gattin des Galvani gewesen und ihr gebühre eigentlich die Ehre der Entdeckung. Eine namentliche Bezeichnung des „Anderen“ durch Galvani würde demselben allerdings die Unsterblichkeit gesichert haben; trotzdem kann man Galvani aus seiner Unterlassung dieser Bezeichnung keinen Vorwurf machen. Was der „Andere“ beobachtet hatte, war nichts weiter, als eine eigenthümliche Art des allgemein bekannten Einflusses, welchen die Reibungselektricität beim Durchgang durch den thierischen Körper äussert, und dass hier der Funken der Elektrisirmaschine nicht direkt wirkte, durfte nach den Untersuchungen der elektrischen Influenz nicht mehr wunderbar erscheinen. Jedenfalls theilte Galvani selbst die noch jetzt ebenso verbreitete als falsche Meinung nicht, als sei mit jener Beobachtung schon eine ganz neue Art der Elektricität entdeckt; vielmehr war er nur eifrig bemüht, den Einfluss der bekannten Elektricitätsquellen auf die thierischen Muskeln nach allen Seiten hin festzustellen. Die dahin gehenden, mühsamen und sorgfältigen vielfachen Versuche führten ihn erst zu neuen, ganz unerwarteten Erfolgen. Galvani constatirte demnach, dass die Zuckungen nur erfolgten, wenn

---

[1]) Einer in Bologna angebrachten Gedenktafel nach hat Galvani im Monat September des Jahres 1786 zum ersten Male die Zuckungen der Frösche am Balkongeländer des betreffenden Hauses beobachtet.

Funken aus der Maschine gezogen wurden, dass aber dieselben bald stärker, bald schwächer erschienen, unabhängig von der Intensität der Maschinenelektricität, je nachdem man mit der Hand mehr den beinernen Griff des Messers oder die eiserne Umfassung und die eisernen Nägel berührte. Versuche mit eisernen Stangen oder ganz trocknen gläsernen Röhren ergaben sicher, dass zum Eintreten der Erscheinungen jedenfalls die Berührung der Nerven mittelst eines leitenden Körpers und zwar von genügender Grösse erfordert ward. Die Verbindung der Muskeln mit einem ableitenden Körper, oder die Ableitung derselben mit einem Draht zur Erde, beförderte in hohem Maasse die Muskelcontractionen. Galvani unterschied darum Nerven- und Muskelconductoren, die für das Auftreten der Zuckungen nöthig oder

Thierische Elektricität, c. 1790 bis c. 1800.



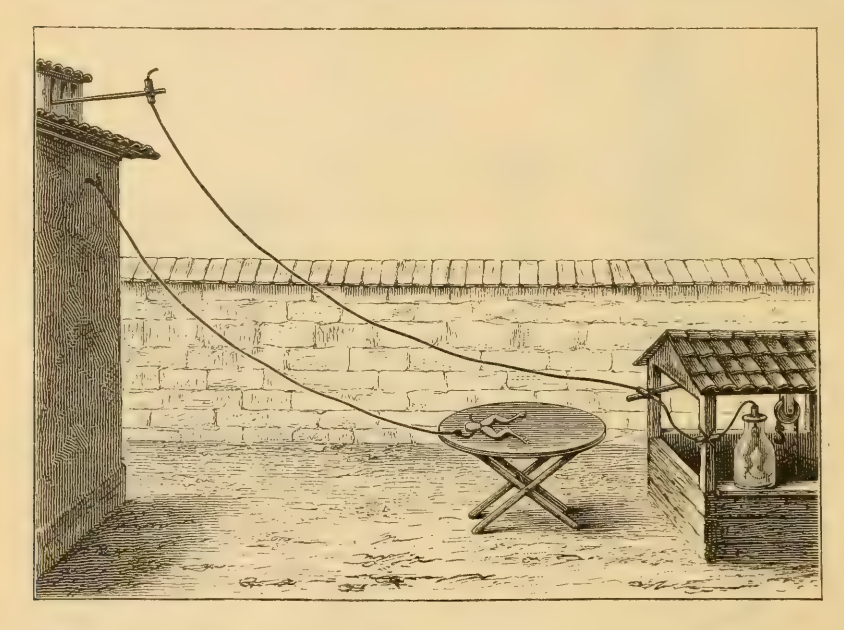
wenigstens dienlich sind[1]). Die Zusammenziehungen selbst standen bis zu gewissen Grenzen im directen Verhältniss sowohl zur Stärke des Funkens und des Thieres, als auch zur Stärke der Conductoren, vorzüglich des Nervenconductors, aber im umgekehrten Verhältniss zur Entfernung vom Conductor der Maschine. Funken negativer Elektricität wirkten ganz wie die positiver, Funken

[1]) Beistehende Figur, nach der ersten Tafel des galvanischen Werkes gezeichnet, veranschaulicht die Einrichtung dieser Conductoren.

Thierische Elektricität, c. 1790 bis c. 1800.

eines Elektrophors, wie die einer Maschine. Bei lebendigen Thieren erfolgten die Zuckungen, wenn man die Schenkelnerven heraustrennte und berührte, ganz wie bei todten. Warmblütige Thiere gaben ebenso Zuckungen, wie kaltblütige, nur waren dieselben meist etwas geringer.

Danach untersuchte Galvani ebenso die Wirkungen der natürlichen elektrischen Funken, nämlich der Blitze. Ein langer Draht wurde vom Dache des Hauses herabgeleitet, und die Schenkel der Frösche wurden mit den Nervenenden daran befestigt. Ein anderer Conductor (Muskelconductor) hing an den Füssen der Thiere und führte hinab bis zum Wasser eines im Hofe befindlichen Brunnens [1]. „So oft nun Blitze hervorbrachen, so oft geriethen in den nämlichen Augenblicken die Muskeln in heftige und vielmalige Zusammenziehungen, und zwar so, dass



die Muskelbewegungen und Zusammenziehungen dieser Thiere, ebenso wie das Licht und das Leuchten des Blitzes dem Donner vorgingen und denselben ankündigten. Die Uebereinstimmung dieser Erscheinungen selbst war so gross, dass die Zusammenziehungen vorgingen, wenngleich kein Muskelconductor angebracht oder jener der Nerven isolirt war.“ Auch ohne Blitze erfolgten Zusammenziehungen, wenn nur der Himmel stürmisch war, oder wenn Wolken nahe an dem Nervenconductor vorüberzogen, dann aber zeigten auch aufgestellte Elektrometer immer Elektricität an. Nun war Galvani begierig, zu erfahren, ob nicht auch

[1]) Die beistehende Figur ist nach der zweiten Figurentafel des angeführten Galvani'schen Werkes gezeichnet.

die normale atmosphärische Elektricität Einfluss auf die Froschmuskeln habe, die sich bisher als so empfindliche Elektroskope gezeigt. „Aus dieser Ursache, da ich manchmal auf dem eisernen Geländer des Gärtchens, welches unser Haus umgab, die Frösche, welche, zu den Versuchen zubereitet, mit eisernen Häkchen durch das Rückenmark gestochen waren, in die gewöhnlichen Zusammenziehungen auf diesen Geländern gerathen sah, und zwar nicht nur, wenn es blitzte, sondern auch bei heiterem und ruhigem Wetter, so glaubte ich, die Ursache dieser Zusammenziehungen liege in den Veränderungen, die über Tags in der atmosphärischen Elektricität vorgingen. — Ich beobachtete deshalb diese zubereiteten Thiere zu verschiedenen Stunden und mehrere Tage nacheinander, aber ich bemerkte kaum einige Bewegungen in den Muskeln. Des langen Wartens müde, bog und drückte ich dann die metallenen Häkchen, womit ihr Rückenmark durchstochen war, an das eiserne Geländer, um zu sehen, ob durch diesen Kunstgriff Muskelbewegungen hervorgebracht würden und ob nach dem verschiedenen Stande der Atmosphäre und der Elektricität irgend eine Veränderung oder Verschiedenheit sich zeigen würde. Nicht selten bemerkte ich zwar Zusammenziehungen, aber keine in Rücksicht auf den verschiedenen Stand der Atmosphäre und der Elektricität. Da ich aber diese Zusammenziehungen nur in freier Luft gesehen hatte (noch hatte ich nirgends anders Versuche angestellt), so fehlte wenig, dass ich nicht solche Zusammenziehungen der atmosphärischen Elektricität zugeschrieben hätte, die in die Thiere strömt, sich in denselben häuft und sich durch die Berührung mit dem eisernen Geländer heftig entladet.“ Bis zu diesen Versuchen ist also die Idee einer neuen Quelle der Elektricität in Galvani noch nicht entstanden, erst mit dem Gedanken, die Versuche so wie im Freien, nun auch im geschlossenen Raume zu wiederholen, erfolgte die Wendung[1]). „Da ich (dann)“ fährt Galvani fort, „einen Frosch in ein geschlossenes Zimmer gebracht, denselben auf eine eiserne Scheibe gelegt und den in das Rückenmark gesenkten Haken dem Eisen genähert hatte, so erschienen die nämlichen Bewegungen, die nämlichen Zusammenziehungen. Ich versuchte nun also gleich das Nämliche mit anderen Mitteln an verschiedenen Orten, zu verschiedenen Stunden und Tagen, aber der Erfolg war immer derselbe; ausser dass die Zusammenziehungen nach der Verschiedenheit der Mittel auch verschieden waren, mit einigen nämlich heftiger, mit anderen schwächer. Nichtleitende Körper gaben dabei keine Zusammenziehungen. Ueber solch einen Erfolg wunderten wir uns nicht wenig und allmählich vermutheten wir eine dem Thiere anklebende Elektricität. Diese Vermuthung

Thierische Elektricität, c. 1790 bis c. 1800.

---

[1]) Von dem kupfernen Haken, der mit dem eisernen Geländer zusammen in der Tradition eine grosse Rolle spielt, kann ich in der Erzählung Galvani's keine Spur entdecken.

Thierische Elektricität, c. 1790 bis c. 1800.

wurde noch vermehrt, da wir von ungefähr einen scheinbaren Umlauf der dünnen Nervensäfte zur Zeit der Erscheinung von den Nerven in die Muskeln zu bemerken glaubten, welcher dem Umlaufe, der in der Leydener Flasche geschieht, nahe kommt. Denn, als ich mit der einen Hand einen zubereiteten Frosch an dem durchs Rückenmark gestochenen Haken so hielt, dass seine Füsse eine silberne Schale berührten, mit der anderen aber den Obertheil oder die Seiten der silbernen Schale, auf der die Füsse des Frosches waren, mit einem metallenen Körper berührte, so gerieth das Thier wider alle Hoffnung in heftige Bewegungen, und das zwar so oft, als ich mich dieses Kunstgriffes bediente." Galvani änderte den letzteren Versuch auch so ab, dass er den Frosch hielt und ein Anderer die silberne Schale berührte. Dann erfolgte Nichts, aber wenn beide Männer sich die Hand gaben und so eine Kette bildeten, erschienen wieder die Zuckungen bei jedem Berühren. Noch schöner aber war der folgende Versuch: „Wenn ein Frosch mit einem Schenkel so in die Höhe gehalten wird, dass der Haken des Rückenmarks irgend eine silberne Scheibe berührt, der andere aber frei auf die nämliche Scheibe fällt, so geschieht es, dass, sowie der Schenkel die silberne Fläche berührt, so ziehen sich auch die Muskeln zusammen, daher steigt der Schenkel und wird in die Höhe gezogen, lässt aber sogleich wieder nach und fällt wieder zurück, steigt aber auch aus eben der Ursache sogleich, wie er die Scheibe berührt, wieder in die Höhe, und so fährt er wechselsweise fort zu steigen und zu fallen und gleicht zu nicht geringer Verwunderung und Vergnügen des Naturforschers einem elektrischen Pendel". Man bedarf auch zu den Versuchen gar keiner metallenen Scheiben, sondern braucht nur durch einen metallenen Bogen den Nerven eines Schenkels mit dem Muskel zu verbinden. Nur ist dabei merkwürdig, dass bei Anwendung eines einzigen Metalls oft nur schwache Bewegungen erhalten werden, ja dass dieselben manchmal ganz aufhören, dass aber, wenn man ein Stück Kupfer oder gar Silber [1]) einschaltet, die Zusammenziehungen allsogleich stärker und von längerer Dauer werden. Am meisten werden die Muskelbewegungen gestärkt, wenn man die Nervenenden mit Stanniol belegt und dann einen leitenden Körper als Bogen anwendet; dann kann man sogar in den Bogen mehrere Menschen einschalten, ohne dass die Bewegungen merklich geschwächt werden. Wahrscheinlich, dass in den Belegungen, wie in der Leydener Flasche, die eigenthümliche thierische Elektricität sich stärker ansammelt, als sie es ohne dies thun würde. Wo aber nun diese Elektricität ihren eigentlichen Sitz hat „ob nämlich eine im Muskel und die andere im Nerven, oder beide in eben demselben Muskel und aus welchem Theil sie fliesse, ist sehr schwer zu bestimmen. Wenn es aber erlaubt ist, in dieser

---

[1]) „Silber scheint uns vor allen Metallen zur Leitung der thierischen Elektricität am geschicktesten zu sein."

Dunkelheit einige Muthmaassungen zu wagen, so bin ich dafür, den Sitz beider Elektricitäten in den Muskel zu setzen. . . . Dies vorausgesetzt, wird die Hypothese und Muthmaassung weder unschicklich noch der Wahrheit unähnlich sein, welche eine Muskelfiber einer kleinen Leydener Flasche oder einem ähnlichen elektrischen, mit jener zweifachen und entgegengesetzten Elektricität versehenen Körper vergleicht, den Nerven für den Conductor der Flasche nimmt und folglich den ganzen Muskel für eine Menge Leydener Flaschen ansieht.“ Galvani führt eine Menge Eigenschaften der thierischen Elektricität an, die diesen Vergleich stützen, giebt dann auch einige, die dagegen sprechen, kommt aber doch zu dem Schluss: „Es sei uns also erlaubt, einer solchen nicht sehr unwahrscheinlichen Hypothese zu folgen, die wir aber sogleich wieder verlassen, wenn andere Gelehrte bessere Meinungen darüber aufstellen sollten, oder wenn die Entdeckungen der Naturforscher oder neue über diese Sache angestellte Versuche eine noch bessere darbieten sollten.“ Nachdem dann Galvani noch seine thierische Elektricität mit der gewöhnlichen Reibungselektricität, wie mit der Elektricität der Fische verglichen und sie auch von diesen unterschieden hat, so kommt er nun auf das für ihn als Anatomen interessanteste Gebiet, die Erklärung der thierischen Bewegungen durch die Elektricität und die Heilung von Krankheiten mit Hülfe derselben. Vom Gehirn aus wird das Gleichgewicht der immer vorhandenen Elektricität zuerst in den Nerven und dann, weil die Nerven gute Leiter, auch in den betreffenden Muskeln gestört. Jede Störung des Gleichgewichts in den Muskeln erzeugt aber, wie durch die Versuche mit künstlicher Elektricität bewiesen wird, eine Contraction der Muskeln. Die Heilung von Krankheiten mittelst künstlicher Elektricität kann dadurch geschehen, dass man entweder, je nach dem Uebel, die künstliche Elektricität in derselben Richtung wie die natürliche, thierische fliessen und somit diese verstärken lässt, oder dadurch, dass man durch entgegengesetzte künstliche Ströme zu starke Wirkungen der thierischen Elektricität aufhebt.

Thierische Elektricität, c. 1790 bis c. 1800.

So hatte Galvani mit unläugbarer Genialität eine bedeutende Aufgabe gelöst. Er hatte den elektrischen Strom, welcher immerwährend einen aus Froschschenkeln und Metallen gebildeten Kreis durchläuft, trotz aller Schwierigkeit sicher constatirt und eine Menge seiner Eigenschaften, wie seine Beeinflussung durch die Metalle und die thierische Substanz, richtig beobachtet. Dass er sich in der Quelle dieser Elektricität der Hauptsache nach irrte, hat ihn einen grösseren Theil seines Ruhmes gekostet, als recht und billig war. Jedenfalls ist die landläufige Ansicht, nach welcher Galvani von Anfang an zwei Metalle bei seinen Versuchen angewandt und so bei einiger Genialität gleich zum Begriff einer Contact- oder Metallelektricität hätte kommen müssen, absolut falsch. Galvani glaubte, dass die Metalle nur als Leiter wirkten und wandte Kupfer

Thierische Elektricität, c. 1790 bis c. 1800.

oder Silber neben Eisen nur der besseren Leitung wegen an. Seine Versuche gelangen ihm auch später bei Abwesenheit jedes Metalls, als er die Muskeln nur noch mit gläsernen Messern präparirte. Die hiermit sicher constatirte thierische oder physiologische Elektricität, welche seine Gegner übersahen, hinderte ihn seinerseits zu bemerken, dass in seinen meisten Versuchen nicht diese Elektricität, sondern eine stärker erregte Metallelektricität die beobachteten Wirkungen verursachte.

Das ungeheure Aufsehen, welches Galvani's Entdeckungen erregte, erweckte natürlich zahlreiche Nachfolger. Dr. Eusebius Valli bestätigte in einem Briefe vom 5. April 1792 die Galvani'schen Versuche und gab zugleich Nachricht über die Elektricität aller möglichen Thiere, vorzüglich solcher, die er auf irgend eine unnatürliche Weise ums Leben gebracht hatte. Er erwähnte auch in diesem Briefe, dass Volta („einer der ersten Naturkundigen im Fache der Elektricität, ein Genie unter den Physikern") schon ernstlich in diesem Gebiete arbeite. Volta selbst hatte schon am 3. April 1792 in einem Briefe an einen Mailänder Arzt diese Arbeiten beschrieben. Er hatte wie Galvani die Frösche am empfindlichsten gefunden, wenn die Schenkelnerven entblösst und mit einem dünnen Metallplättchen bekleidet wurden; sie waren dann schon durch eine Ladung der Leydener Flasche zu erschüttern, die man nicht mehr mit dem Elektrometer messen und die also kaum ein zehntel Grad des Bennet'schen (Goldblatt-)Elektrometers betragen konnte. Er constatirte danach weiter, dass die Frösche ein Elektroskop abgeben könnten, viel empfindlicher, als man bis dahin nur eines besitze. Wie in diesem Briefe, zeigt sich Volta noch in zwei anderen, die ebenfalls im Jahre 1792 in dem Giornale fisico-medico von Brugnatelli erschienen, als Anhänger der thierischen Elektricität, lässt aber nun doch schon bemerken, dass er bald von Galvani ablenken dürfte. Bei der Gelegenheit, wo Volta die Bedingungen aufzählt, unter denen die Contractionen der Muskeln stattfinden, sagt er: „Drittens müssen diese Belegungen aus verschiedenen Metallen bestehen: eine aus Blei oder Zinn, die andere aus Gold, Silber, Messing oder Eisen. Die Verschiedenheit der Metalle wird unumgänglich erfordert, und wäre es ja, dass beide aus einerlei Materie beständen, so muss wenigstens ein grosser Unterschied in der Art sie anzulegen gebracht werden". Er macht hier auch darauf aufmerksam, wie Galvani schon bemerkt habe, dass zwei Metalle die Erscheinungen befördern, und meint, wenn ein Bogen aus einem Metall allein wirke, so möge wohl das Metall nicht überall ganz gleich sein. Endlich theilt er die Metalle nach der Art, die thierische Elektricität zu vertheilen, in drei Klassen, nämlich 1) Zinn und Blei, 2) Eisen, Kupfer, Messing und 3) Gold, Silber und Platin. Später kommt er darauf zurück, dass man nicht bloss in ganzen Thieren, oder einzelnen Gliedern, sondern sogar in einzelnen Muskelstückchen Contractionen hervorrufen könne, wenn man nur immer

Thierische Elektricität c. 1790 bis c. 1800.

unähnliche Belegungen anwende. „Bestehen diese einestheils aus einem gut angeklebten Stanniol und anderntheils aus einer Silberbelegung, die das Glied nur berührt, so gelingen die Versuche am besten.“ Endlich giebt Volta in diesen Abhandlungen noch eine ganz neue Entdeckung. Unähnliche Belegungen verursachen beim Durchgange der elektrischen Materie durch die Muskeln der Zunge in gewissen Fällen keine Contractionen, sondern Geschmacksempfindungen. Um diese letzteren zu erzeugen, muss man ein reines, glattes Streifchen Stanniol auf die Zungenspitze legen und gut andrücken; auf die Mitte oder einen anderen Theil der Zunge legt man eine Gold- oder Silbermünze oder was immer anderes dieser Metalle und bringt diese beiden Belegungen zur Berührung. Dann wird man auf der Zunge einen mehr oder weniger, nach der Art der Metalle, lebhaften sauren Geschmack empfinden [1]). „Sehr merkwürdig ist noch, dass dieser Geschmack die ganze Zeit hindurch, so lange sich nämlich das Zinn und Silber berührt, fortdauert und an Lebhaftigkeit stets zunimmt. Das beweist, dass der Uebergang der elektrischen Materie von einem Ort auf den anderen unaufhörlich fortwährt. . . . Nicht weniger merkwürdig ist es, wenn man den Versuch umkehrt und die Silberbelegung auf die Zungenspitze, auf die Mitte derselben aber das Zinn oder das Silberpapier bringt, so empfindet man an der Zungenspitze einen ganz anderen Geschmack, der nicht mehr sauer, sondern vielmehr alkalinisch, scharf, sich dem bitteren annähernd ist.“ Volta erwartet viel von dieser Entdeckung, aber er will sich vor der Hand nicht auf leere Muthmaassungen einlassen, sondern ganz auf dem Wege der Versuche bleiben.

In der That konnte er schon im nächsten Jahre (wieder in Brugnatelli's Journal) eine neue interessante und folgenreiche Abänderung jenes Versuches melden: „Ich habe durch Hülfe von verschiedenen Belegungen, mit denen man den Geschmack erweckt, auch die Empfindung des Lichts hervorgebracht. — Ich lege an den Augapfel das äusserste Ende eines Zinnblättchens und in den Mund eine Silbermünze oder Löffel; alsdann bringe ich diese Stücke mittelst zweier metallenen Spitzen in Berührung. Dieses ist genug, um auf der Stelle, oder so oft die Berührung erneuert wird, die Erscheinung eines Lichtes oder übergehenden Blitzes zu erhalten. . . . Aus allen diesen Versuchen . . . lässt sich keineswegs auf eine wahre thierische Elektricität schliessen. . . . Ich habe Versuche gemacht, welche einen gleichen Uebergang der Elektricitätsflüssigkeit anzeigen, wenn Metalle von verschiedenen Gattungen an alle übrigen nicht animalischen Körper angebracht werden, auch an andere feuchte Gegenstände, als Papier, Leder, Tuch u. s. w., welche in Wasser durchgeweicht wurden, und noch besser an dem Wasser

[1]) Joh. Georg Sulzer (1720 bis 1779) hat schon 1752 (Histoire de l'Acad., Berlin 1754: Des plaisirs des sens, p. 356) diesen Versuch beschrieben, aber ohne eine Erklärung zu geben, nur der merkwürdigen Empfindung wegen.

Thierische Elektricität, c 1790 bis c. 1800.

selbst. Dies ist bis jetzt der ganze Erfolg einer solchen Vereinigung der Metalle, unter welchen Umständen sie nicht bloss Leiter, sondern wirkliche Beweger und Erreger der Elektricität sind, und dieses ist eine Hauptentdeckung." Volta wird, wie er selbst sagt, je mehr die Anzahl seiner Versuche wächst, immer mehr überzeugt, dass die elektrische Materie niemals durch die Lebenskraft oder in den Organen selbst erzeugt werde, sondern dass sie nur von der Verschiedenheit, vielleicht einer ganz geringfügigen, der Metalle herrührt. „Wenn die Sache sich nun so verhält, was bleibt dann von der galvanischen thierischen Elektricität, welche er (Galvani) durch seine schönen Versuche bewiesen zu haben scheint, übrig? Nichts anderes, als die übermässige Empfindlichkeit der Nerven . . ., d. h. eine bloss leidende Disposition, in Bezug auf eine jeder Zeit fremde und künstliche Elektricität, welche sie so zu sagen nur in Gestalt einfacher Elektricitätsmesser empfinden [1])."

Im Jahre 1794 endlich verliess Volta offen und gänzlich die Idee einer thierischen Elektricität. Die betreffende Abhandlung erschien 1794 in Brugnatelli's Journal in Form von Briefen an Dr. Vasalli. Sie geht gleich mitten in die Sache: „Was halten Sie von der vermeintlichen thierischen Elektricität, was mich betrifft, so bin ich seit geraumer Zeit überzeugt, dass die ganze Action ursprünglich von den Metallen herrührt, kraft welcher Berührung das elektrische Fluidum in den feuchten oder wässerigen Körper von eben diesen Metallen, von dem einen mehr, von dem anderen weniger vordringt [2])." Volta behauptet also, dass bei der Berührung verschiedener Metalle die Elektricitäten in denselben sich so vertheilen, dass das eine Metall die eine Art, das andere Metall die andere Art von Elektricität erhält, so dass dann, wenn der leitende Bogen zwischen beiden Metallen geschlossen wird, in demselben ein ununterbrochener Strom von Elektricität erzeugt wird. Er vervollständigte auch frühere Angaben dahin, dass der elektrische Strom um so stärker werde, je mehr die beiden angewandten Metalle in der Reihe: Zink, Zinn, Blei, Eisen, Messing, Bronze, Kupfer, Platina, Gold, Silber, Quecksilber weiter von einander stünden, und bemerkte, dass Graphit und feste Kohle wie Metalle wirkten. Galvani's entgegenstehende Beobachtungen, nach denen man auch mit einem einzigen Metall die Zuckungen in den Fröschen hervorrufen könne, erklärte er durch den Hinweis auf die fast immer stattfindende Heterogenität und die immer vorhandenen kleinen Unterschiede in demselben Metall und zeigte sogar durch Experimente, dass ein metallischer Bogen, der nicht fähig war die Erscheinungen hervorzurufen, doch diese Kraft erlangte, wenn man

---

[1]) Volta's Abhandlungen über die thierische Elektricität, die bis 1793 erschienen, sind übersetzt von Dr. Joh. Mayer, Prag 1793.

[2]) Gren's Neues Journal der Physik II, S. 141.

seine Hälften verschieden erwärmte oder härtete, oder in verschiedenem Maasse oxydirte. Er machte auch darauf aufmerksam, dass die Reibungs-elektricität ähnliche Erscheinungen zeige. Zwei gleiche Körper gäben beim Reiben an einander keine Elektricität, aber oft brauche man nur die Oberfläche des einen Körpers zu verändern, um Elektricität zu erhalten. Danach hielt er sich für berechtigt, alle elektrische Wirkung nur den Metallen zuzuschreiben und den Namen thierische Elektricität durch metallische Elektricität zu ersetzen.

Thierische Elektricität, c. 1790 bis c. 1800.

Indessen waren hiermit Galvani und auch manche andere Physiker, wie Carminati, Valli, Aldini (der Neffe Galvani's), u. A. noch nicht überzeugt. Und man darf ihnen auch nicht ohne Weiteres Unrecht geben, denn bis dahin waren die Erscheinungen noch immer durch eine thierische ebensogut, wie durch eine metallische Elektricität zu erklären, und dann hatte ja ihre Erklärungsweise wenigstens das Erstgeburtsrecht. Jene Physiker gingen auch den ganz richtigen Weg, um ihre Ansicht zu stützen, und versuchten nun, aus den Experimenten die Metalle, welche Volta für die Hauptsache erklärte, ganz zu eliminiren. In der Schrift De animali electricitate (Bologna 1794) konnte Aldini auch wirklich das Gelingen dieser Versuche anzeigen und beweisen, dass Zuckungen ohne Metalle auch durch Schliessung einer nur aus thierischen Theilen bestehenden Kette erzeugt werden könnten. Ja Galvani trieb später, wie schon bemerkt, die Vorsicht so weit, dass er die Frösche mit gläsernen Messern präparirte, und doch erhielt er oft Contractionen, wenn er nur die Nerven und Muskeln der Froschschenkel in Berührung brachte. Trotzdem aber konnte er den Sieg nicht an seine Fahne fesseln. Volta meldete 1795 in Briefen an Gren und 1798 in Briefen an Aldini selbst, dass es ihm gelungen sei, mit Hülfe seines Condensators die durch Berührung von Metallen ohne jede Mitwirkung eines thierischen Muskels erzeugte Elektricität direct nachzuweisen und zu messen, und danach musste man, selbst wenn man an einer thierischen Elektricität festhielt, doch neben dieser auch eine Elektricität der Metalle anerkennen. Galvani selbst konnte die Sache nicht weiter verfechten; er starb, von widrigen Schicksalen gebeugt, schon im folgenden Jahre. Seine Anhänger aber wurden durch die bald nachfolgende Entdeckung der Volta'schen Säule gänzlich zum Schweigen gebracht.

In Deutschland wurde man mit Galvani's Versuchen zuerst durch eine Nachricht des Mainzer Professor Ackermann bekannt, und viele Gelehrte, wie C. Creve, Ed. Jos. Schmuck, Gren, J. Chr. Reil, Alexander v. Humboldt und Chr. H. Pfaff waren dann eifrig und mit Erfolg bemüht, die wunderbaren Versuche zu wiederholen. Im Allgemeinen zeigten sich dieselben den Ansichten Galvani's mehr als denen Volta's zugethan, ja einige wie Creve und noch mehr Humboldt [1]) wollten die Reactionen

[1]) Alex. v. Humboldt's Schrift (Versuche über die gereizte Muskel- und Nervenfaser nebst Vermuthungen über den galvanischen

Thierische Elektricität, c. 1790 bis c. 1800.

der Muskeln gar nicht als eigentlich elektrische Wirkungen, sondern nur als Erscheinungen des Lebensprocesses, als Wirkungen eines eigenthümlichen Agens, der Lebenskraft, die beim Berühren der Nerven und Muskeln in Wirksamkeit trete, gelten lassen.

In Frankreich begann man erst später, nachdem die Stürme der Revolution einigermaassen sich gelegt, mit den Versuchen über galvanische Elektricität. Erst im Jahre 1798 trat eine Commission des Nationalinstituts zusammen, welche die bis dahin bekannten Thatsachen bestätigte, jedoch über die Ursache derselben auch da noch keine bestimmte Meinung äusserte.

In England gab Rich. Fowler[1]) manche neue Versuche über galvanische Elektricität an, kam aber, ähnlich wie die deutschen Physiker, zu der Ansicht, dass die wirkende Ursache in diesen Erscheinungen verschieden von der Elektricität sei. Andere Engländer dagegen, wie Al. Monro, Dr. W. Ch. Well und Cavallo erklärten sich für eine Identität jener Erscheinungen mit den elektrischen, und so blieb auch hier die Sache vor der Hand noch in der Schwebe.

Dagegen kam man noch von einer anderen Seite, die sich an die von Volta entdeckten Geschmackserscheinungen anschloss, der Idee einer metallischen Elektricität näher. Fabbroni[2]) hatte schon 1792 der Akademie von Florenz merkwürdige Versuche mitgetheilt, die er aber erst 1796[3]) weiter bekannt machte. Danach oxydirte sich, wenn man zwei Metalle unter Wasser zur ganzen oder theilweisen Berührung brachte, das leichter oxydirbare viel schneller als an der Luft, ja es oxydirten sich wohl auch Metalle, die an der Luft keinen Sauerstoff aufnahmen. Aehnliche Erscheinungen beobachtete Dr. Edward Ash zu Oxford unabhängig von Fabbroni. Er bemerkte eine auffallende Beförderung der Oxydation des Zinks, wenn dasselbe auf befeuchtetes Silber gelegt wurde, und ebenso verhielt sich Blei auf Quecksilber und Eisen auf Kupfer. Humboldt, der in seinem Werke „über die gereizte Muskelfaser" die Versuche des Dr. Ash bekannt machte, bestätigte durchaus diese Versuche, nahm dabei auch eine Wasserzersetzung wahr, wusste aber (wohl seiner Ansicht von der thierischen Elektricität wegen) diese Erscheinungen nicht zu deuten. Und doch wäre es bei einiger Aufmerksamkeit auf den Gang der physikalischen Untersuchungen nicht schwer gewesen, diese neuen Wirkungen der Metalle als einen neuen Beweis für die Berührungselektricität zu erkennen, da chemische Wirkungen der Reibungselektricität schon seit längerer Zeit bemerkt und

---

Process des Lebens. 2 Bde. Posen und Berlin 1797) ist durch vielfach variirte, sorgfältige Versuche werthvoll.

[1]) Exp. and obs. relative to the Influence lately discov. by Mr. Galvani and comm. called animal Electr. Edinburgh and London 1793.

[2]) Giov. Val. Mattia Fabbroni, 1752 — 1822, Physiker in Florenz.

[3]) Gren's Neues Journ. d. Phys. IV, S. 428 bis 433: Ueber die chemische Wirkung der Metalle auf einander bei gewöhnlicher Temperatur der Atmosphäre.

Thierische Elektricität, c. 1790 bis c. 1800.

beschrieben worden waren. Beccaria hatte 1758 bereits behauptet, dass Metallkalke, wie Mennige, Bleiweiss, Zinnasche etc. durch den elektrischen Funken reducirt würden, und Graf de Milly hatte das bestätigt. Andere Physiker zwar, wie Cadet und Brisson, hielten für wahrscheinlicher, dass die entstandenen Metalle von den geschmolzenen Leitern herrührten. Dem gegenüber aber bewiesen Van Marum[1]) und Paets van Troostwijk[2]) um 1787, indem sie den elektrischen Funken durch Canäle, welche mit Mennige etc. gefüllt waren, gehen liessen, dass ganz entschieden eine Reduction der Metallkalke durch den elektrischen Funken zu bemerken sei. Um dieselbe Zeit erkannte auch Henry Cavendish die Volumveränderung, welche atmosphärische Luft beim Durchschlagen elektrischer Funken erleidet, als eine chemische Wirkung der Elektricität. Er beobachtete, dass weder in reiner dephlogistisirter Luft (Sauerstoff) noch in reiner phlogistisirter (Stickstoff) der elektrische Funke wirksam werde, dass aber in einem Gemisch der beiden der Funke eine chemische Verbindung herbeiführe, die mit der Salpetersäure identisch sei. Auch diese Versuche wurden durch Van Marum bestätigt, der noch weiter bemerkte, dass durch den elektrischen Funken aus Alkohol Wasserstoff entwickelt und Ammoniakgas in Stickstoff und Wasserstoff zersetzt werde. Paets van Troostwijk und Deimann[3]) endlich bemerkten im Jahre 1789, dass beim Durchgange des elektrischen Funkens durch Wasser sich Luft entwickele und dafür nach und nach das Wasser verschwinde, dass aber, wenn man schliesslich den Funken wieder durch die entstandene Luft schlagen lasse, auch diese Luft wieder zu Wasser zurückverwandelt werde. Doch wurden gerade diese Versuche damals nicht nach Gebühr beachtet.

Die verschiedenen Wirkungen, wie Licht, Wärme, welche man nun länger an der (Reibungs-) Elektricität kennen gelernt, hatten natürlich lebhaft zu Speculationen über das eigentliche Wesen dieses merkwürdigen Agens gereizt. Es ist leicht zu begreifen, dass die Entdeckung von chemischen Kräften an der Elektricität diesen Eifer noch vermehrte. Wenn die Elektricität chemische Wirkungen ausübte, so hielt man das für eine Bestätigung der Ansicht, nach welcher die Elektricität ein besonderer elementarer Stoff, oder wenigstens eine eigenthümliche, aus wenigen Elementen zusammengesetzte Flüssigkeit ist. Die vielfachen Zusammenhänge, welche man zwischen Elektricität einerseits und Licht und Wärme andererseits beobachtet hatte, liessen die letztere Ansicht als die wahrscheinlichste erscheinen und drängten zu der Annahme, dass die Elektricität aus Licht- und Wärmestoff bestehe oder doch diese

---

[1]) Martin van Marum, 1750 — 1837, Director des Teylor'schen Museums in Harlem.

[2]) Adriaan Paets van Troostwijk, 1752 — 1837, Negociant in Amsterdam.

[3]) Joh. Rud. Deimann, 1743 — 1808, Arzt in Amsterdam, viel mit Physik und Chemie beschäftigt.

Thierische Elektricität, c. 1790 bis c. 1800.

Stoffe als Elemente enthalte. Dabei blieb man denn auch der alten Meinung, dass die Elektricität nur eine Art von Feuer sei, ziemlich nahe. Leider konnte man über die Art der Zusammensetzung selbst zu keiner erträglichen Uebereinstimmung gelangen.

Wilcke hatte in den beiden Elektricitäten einen Gegensatz wie Feuer und Säure angenommen und statt der Bezeichnungen + Elektricität und — Elektricität die Namen Feuer und Säure eingeführt. Aehnlicher Ansicht waren Kratzenstein, Lichtenberg, Karsten u. A. J. F. Meyer gab als Hauptbestandtheil der Elektricität eine fette Säure an, die beim Reiben aus gewissen Körpern heraustrete. Gren identificirte die Elektricität mit dem Lichtstoff; Achard dagegen stellte die Aehnlichkeiten zwischen der Elektricität und dem Wärmestoff demonstrativ zusammen. Priestley behauptete, dass die elektrische Flüssigkeit Phlogiston enthalten oder auch Phlogiston selbst sein müsse. Henly[1]) sah ähnlicherweise in der Elektricität eine blosse Modification desjenigen Grundstoffs, der im Zustande der Ruhe Phlogiston, bei gewaltsamer Bewegung aber Feuer genannt werde. Er macht dafür vor Allem geltend, dass gewisse (vegetabilische) Materien, welche viel Phlogiston enthalten, d. h. leicht verbrennlich sind, beim Reiben Feuer abgeben und dann negativ elektrisch werden. Die am stärksten ausgebildete Hypothese aber gab Deluc[2]), der seine elektrische Theorie ganz seiner Theorie der Wärme nachbildete. Wie der Wasserdampf aus Wasser und einer expansiven Flüssigkeit, so besteht auch die Elektricität aus einer schweren, der eigentlich elektrischen Substanz und einer expansiven Flüssigkeit (fluide déférent). Positiv und negativ elektrische Körper unterscheiden sich dadurch, dass die letzteren bei gleicher expansiver Kraft weniger elektrische Materie enthalten als die ersteren. Die elektrische Induction erklärt sich auf folgende nicht unwahrscheinliche Weise. Wenn man in die Nähe eines positiv elektrischen Körpers den isolirten Leiter $AB$ bringt, so wird das expansive Fluidum des elektrischen Körpers seiner Natur nach auf den Leiter $AB$ überströmen, da aber dabei das dem elektrischen Körper nähere Ende $A$ dieser Wirkung mehr als $B$ ausgesetzt ist, so wird dort die elektrische Materie mehr Spannung als hier erhalten, und da $AB$ ein Leiter ist, so wird von $A$ nach $B$ elektrische Materie fliessen, bis das Gleichgewicht hergestellt ist. Danach muss dann bei gleicher Spannung $A$ weniger elektrische Materie enthalten als $B$, d. h. $A$ wird — und $B$ + elektrisch sein. Wie seine

[1]) William Henly oder Henley, gestorben 1779, Kaufmann in London. Erfinder des Quadrantenelektrometers und des Ausladers.

[2]) Deluc: Nouv. Idées sur la Météorologie, Paris 1787. Ueber das elektrische Fluidum, Gren's Journ. d. Phys. IV, S. 91. Ausführlich über die damaligen Vorstellungen vom Wesen der Elektricität handelt Gehler's phys. Wörterbuch, 2. Aufl., III, S. 350 bis 389.

Theorie der Verdampfung, so hat auch die elektrische Theorie Deluc's ihrer Zeit viel Anhänger gezählt. Trotzdem konnte sich die letztere nicht einmal so lange halten, wie die erstere; vielleicht weil man eine schwere elektrische Materie überhaupt nicht mehr annehmen mochte, wahrscheinlicher aber noch darum, weil man es bald für unmöglich und darum gänzlich unnütz hielt, über das Wesen der Elektricität überhaupt etwas anderes, als ihre Anziehungs- und Abstossungskraft behaupten zu wollen. Der berühmte Elektriker Pfaff kommt im Jahre 1827 beim Ueberblick über die bis dahin aufgestellten elektrischen Theorien zu dem Schlusse: „Es scheint mir ausgemacht zu sein, dass den elektrischen Erscheinungen eine eigenthümliche Materie, die zu den ätherischen Flüssigkeiten zu rechnen ist, zum Grunde liege. . . . Ebenso ausgemacht scheint es mir zu sein, dass es zweierlei Arten von Elektricität giebt. . . . Was nun das Verhältniss dieser beiden ätherischen Flüssigkeiten gegen die übrigen Imponderabilien betrifft, insbesondere gegen diejenigen, von welchen die Wärme und Lichtthätigkeit abhängt, so ist es als ebenso ausgemacht anzusehen, dass sie mit diesen nicht identisch sind. . . . Ebenso unläugbar ist aber auch, dass sie mit diesen Imponderabilien in einem genauen Verkehr stehen, der jedoch bis jetzt noch nicht vollkommen (?) aufgeklärt werden konnte [1]."

Thierische Elektricität, c. 1790 bis c. 1800.

Lange schon hatten die Mechaniker sich bemüht, die allgemeinen Principien zu finden, mit Hülfe deren die Lösung aller mechanischen Probleme rein analytisch, durch blosse arithmetische Operationen bewirkt werden könnte. Dass solche Principien existirten, das hatten die grossen Analytiker der vorigen Perioden wohl gezeigt, doch war dabei klar hervorgetreten, wie unsicher noch die Begründung aller dieser Principien sei, und ausserdem war man immer in Streit darüber geblieben, welche Principien nun wohl die allgemeinsten und zugleich für die Lösung der Probleme die zweckmässigsten seien. Jetzt setzte **Lagrange** [2]) die ganze Kraft seines gewaltigen

Mechanik, c. 1790 bis c. 1810.

[1]) Gehler's physikalisches Wörterb. III, S. 382 bis 383.

[2]) Joseph Louis Lagrange ist am 25. Januar 1736 in Turin geboren. Seine Eltern waren Franzosen, sehr reich, verloren aber ihr Vermögen. Lagrange wurde im Jahre 1753 Professor der Mathematik an der königl. Artillerieschule in Turin. Mit einigen seiner Schüler gründete er eine wissenschaftliche Privatgesellschaft, aus der später die Turiner Akademie hervorging. Der erste Band der Schriften dieser Gesellschaft, durch die in ihnen enthaltenen Abhandlungen von Lagrange hochberühmt, erschien 1759. In demselben Jahre wurde er Mitglied der Berliner Akademie, 1766 auf die Empfehlung von D'Alembert hin deren Präsident. Nach Friedrich's des Grossen Tode ging er 1787 nach Paris, wo ihm Marie Antoinette eine Wohnung im Louvre anwies. 1789 widersetzte er sich der vorgeschlagenen Einführung des Zwölfersystems der Zahlen, weil er die gewöhnlichen Brüche durch Decimalbrüche ersetzt sehen

Mechanik, c. 1790 bis c. 1810.

Geistes daran, zu beweisen, dass ein mechanisches Princip, das der virtuellen Geschwindigkeit, alle anderen Principien umfasse und für die Lösung aller mechanischen Aufgaben genüge. Das Werk, in welchem er dieses versuchte, führte den Titel Mécanique analytique; es erschien zum ersten Male in Paris im Jahre 1788 und stark vermehrt von 1811 bis 1815 in zweiter Auflage. Der geschlossene, streng analytische Charakter des Werkes gab der theoretischen Mechanik überhaupt ihr Gepräge. Newton's synthetische Methode wurde durch dasselbe fast ganz aus der Mechanik verdrängt, und erst lange Zeit nach Lagrange vermochte neben der arithmetisch-analytischen Methode auch die geometrisch-synthetische sich wieder Terrain zu erobern.

Die Vorrede des Werkes bezeichnet klar die Art und Weise desselben. „Man hat schon mehrere Handbücher der Mechanik, doch ist der Plan von diesem hier ganz neu. Ich habe mir vorgenommen, die Theorie dieser Wissenschaft und die Kunst, alle ihre Aufgaben zu lösen, auf einfache Formeln zurückzuführen, deren einfache Erörterung alle die Gleichungen giebt, welche zur Lösung irgend einer Aufgabe nöthig sind. ... Dieses Werk wird ausserdem einen anderen Nutzen haben; es wird die verschiedenen mechanischen Principien, welche man zur Erleichterung der Auflösung der mechanischen Aufgaben bis jetzt gefunden hat, vereinigen und aus einem Gesichtspunkte darstellen, indem es die Verbindung und gegenseitige Abhängigkeit derselben zeigen und zugleich in den Stand setzen wird, über ihre Richtigkeit und Tragweite zu urtheilen. ... Man wird keine Figuren in dem Werke finden. Die Methoden, welche ich darin auseinandersetze, verlangen weder Constructionen noch geometrische und mechanische Schlüsse, sondern allein algebraische Operationen, die einen regelmässigen und immer sich gleichenden Gang einhalten."

Das ganze Werk zerfällt in eine statische und eine dynamische Abtheilung, deren einzelne Sectionen bis auf eine Ausnahme einander streng entsprechen. Die ersten Sectionen beider Abtheilungen geben eine historische Uebersicht über die Entwickelung der mechanischen Principien vor Lagrange. In der statischen Abtheilung wird dabei das Princip der virtuellen Geschwindigkeit folgendermaassen formulirt: „Wenn irgend ein System von beliebig vielen Körpern oder Punkten, an denen irgend welche Zug- oder Druckkräfte wirken, im Gleichgewichte sich befindet und man ertheilt

---

wollte. Nach der Schreckenszeit wurde er Professor der Mathematik an der École normale, dann an der École polytechnique. Er starb am 10. April 1813 in Paris. Lagrange hat als Mathematiker und Mechaniker Schule gemacht. H. Hankel (Entw. d. Mathematik, Tübingen 1885, S. 14) charakterisirte ihn mit den Worten: „Allgemeine Methoden und Theoreme sind sein Ziel; die Eleganz der Methode bedeutet ihm fast mehr, als das Resultat selbst. Daher gilt er für den eleganten Mathematiker par excellence, aber seine Eleganz hat etwas Kaltes, Vornehmes; seine Schreibart ist reflectirt und knapp. ... Diese Eigenthümlichkeiten sind seitdem allgemeine Züge der Mathematik geworden."

diesem Systeme irgend eine kleine Bewegung, vermöge deren jeder Punkt einen unendlich kleinen Raum (die virtuelle Geschwindigkeit) durchläuft, so wird die Summe aus den Kräften, jede multiplicirt mit dem Raume, welchen der Punkt, an dem sie angebracht ist, in der Richtung der Kraft durchlaufen hat, immer gleich Null sein; vorausgesetzt, dass man die kleinen Räume, welche in dem Sinne der Kraft durchlaufen werden, als positiv, diejenigen aber, welche im entgegengesetzten Sinne durchlaufen werden, als negativ nimmt." Die zweite statische Section bringt diesen Satz auf die Formel $Pdp + Qdq + Rdr \ldots = 0$ und kennzeichnet dieselbe als die Grundlage der ganzen Statik. Der entsprechende dynamische Abschnitt kommt zur Grundgleichung der Dynamik, indem er die Summe der virtuellen Momente der wirkenden Kräfte gleichsetzt der Summe der virtuellen Momente der resultirenden Bewegungen. Schafft man in dieser Gleichung die letzteren Glieder mit umgekehrten Vorzeichen auf die linke Seite, so stellt die erhaltene Formel das D'Alembert'sche Princip dar, welches auch Lagrange als das allgemeine Hülfsmittel charakterisirt, um alle dynamischen Probleme auf statische zurückzuführen. Die dritten Sectionen leiten aus der Grundgleichung die allgemeinen Eigenschaften des Gleichgewichtes und der Bewegung ab. Die statische Abtheilung entwickelt aus der Grundformel die sechs Gleichungen, nach welchen die Translation und die Rotation eines Körpers unmöglich werden. Die dynamische Section ergiebt ganz entsprechend die drei Gleichungen, welche das Princip der Flächen oder der Rotationsmomente aussprechen. Ausserdem werden die Principien der lebendigen Kraft und der geringsten Wirkung abgeleitet, sowie auch die Bewegungen der Körper in Beziehung auf ihre Hauptachsen untersucht.

Mechanik, c. 1790 bis c. 1810.

Die vierten Sectionen dehnen die Gleichgewichts- und Bewegungsgleichungen auf Körper aus, die nicht frei sich bewegen, sondern einem gewissen Zwange unterworfen sind. Zu dem Zwecke erfindet Lagrange seine berühmte Methode der unbestimmten Factoren. Er multiplicirt die Variationen aller Bedingungsgleichungen, denen der Körper in seiner Bewegung genügen muss, mit unbestimmten Factoren, fügt diese Producte einfach seinen Gleichungen als Glieder an und behandelt dann die Bewegungsgleichung des Körpers wie die eines völlig freien. Die fünften Sectionen zeigen die Anwendung der allgemeinen Formel auf Einzelfälle. Die statische behandelt das Gleichgewicht eines einzelnen Punktes, das Gleichgewicht von Punktsystemen, deren Glieder durch Fäden oder Stangen verbunden gedacht werden, das Gleichgewicht eines Fadens und endlich das Gleichgewicht eines festen Körpers von messbarer Grösse. Der dynamische Abschnitt untersucht die Bewegung eines Körpers, der unendlich kleine Schwingungen macht, die Bewegungen von freien Punkten unter Einfluss von Attractionskräften und schliesslich die Bewegungen von Punkten,

Mechanik, c. 1790 bis c. 1810.

die statischen Bedingungen unterliegen. Der sechsten dynamischen Section fehlt naturgemässer Weise der analoge statische Abschnitt, sie behandelt die Rotation der Körper.

Die drei letzten Sectionen beider Abtheilungen endlich sind der Mechanik der Flüssigkeiten gewidmet; die ersten derselben geben wieder eine historische Entwickelung der betreffenden Principien. Die nachfolgenden Sectionen zeigen, dass die allgemeinen Grundgleichungen der Statik und Dynamik direct auch auf die Mechanik unelastischer Flüssigkeiten anzuwenden sind, wenn man denselben ein Glied anfügt, welches der Bedingungsgleichung, unter welcher die incompressiblen Flüssigkeiten stehen, entspricht. Diese Bedingungsgleichung ist $dx\,dy\,dz = \text{const.}$; sie drückt aus, dass jedes Flüssigkeitstheilchen ein constantes Volumen hat. Für die Mechanik elastischer Flüssigkeiten werden in den letzten Sectionen Grundgleichungen entwickelt, die denen der vorigen Sectionen ganz ähnlich sind. Die unelastischen und die elastischen Flüssigkeiten unterscheiden sich nur dadurch, dass in den letzteren die Volumina der Elemente nicht constant, sondern, entsprechend dem Elasticitätscoëfficienten, veränderlich sind. Die Grundgleichung der Hydromechanik geht also in die der Aëromechanik über, wenn man an Stelle des Gliedes, welches die Constanz des Volumenelementes bedingt, ein anderes Glied einfügt, das ein der Elasticität entsprechendes Streben nach Veränderung des Volumens ausdrückt.

Die Mécanique analytique ist ein Werk von so festem Schlusse, so systematischer Durchbildung, dass ein principieller Fortschritt über dasselbe hinaus auf ihrem eigenen Gebiete nicht möglich scheint. Die Mechanik erscheint durch dieses Werk als abgeschlossen; wo die Lösung der Probleme nicht gelingt, da liegt das nur an der Mathematik, welche die vorliegenden allgemeinen Formeln für die betreffenden Fälle nicht zu bearbeiten vermag. Was Lagrange in der Vorrede versprochen, alle mechanischen Schwierigkeiten auf rein mathematische zu reduciren, das hat er in seinem Werke in erstaunlicher Weise gehalten. Auf der anderen Seite freilich bedingt auch die systematische Abgeschlossenheit des Werkes eine Einseitigkeit und damit auch eine Unvollkommenheit desselben. Indem das Werk die geometrisch-synthetische Methode ganz ausschliesst, wird es in vielen Problemen zu weitläufigen, oft dem Kerne der Sache ganz fremden Entwickelungen gezwungen, wo die synthetische Methode direct und offenbar zweckentsprechend zum Ziele geführt hätte. Es ist hierfür in hohem Grade charakteristisch, dass die synthetisch-geometrische Methode, die einige Zeit hindurch aus dem Gebiete der Mathematik ganz verdrängt schien, gerade in der Behandlung der Mechanik wieder ihre erste Stütze und damit den Punkt fand, von dem aus sie sich wieder das ihr gebührende Ansehen in der Mathematik verschaffen konnte.

Mechanik, c. 1790 bis c. 1810.

Dabei war auch ein principieller Schatten in dem festen Gefüge noch bemerkbar. Die alten Schwierigkeiten erkenntnisstheoretischen Herkommens, welche schon lange allen mechanischen Principien die Existenzberechtigung unsicher gemacht, sollten auch der Grundlage der ganzen Mécanique analytique durchaus nicht erspart bleiben. Axiom, Theorem oder Erfahrungsthatsache, zwischen diesen drei Angelpunkten wurde, wie alle physikalischen ersten Sätze, auch bald das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten wieder umhergeworfen. In der ersten Auflage der Mécanique analytique entwickelt Lagrange das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten historisch und zeigt, wie dasselbe nach und nach aus dem Hebelprincipe, dem Gesetze für die Zusammensetzung der Bewegungen etc., zur Allgemeinheit sich gestaltet hat. Diese Entwickelung entspricht aber nicht dem Gedanken des Werkes, wonach ja umgekehrt dieses Princip das Fundament aller anderen mechanischen Principien sein soll. Lagrange versuchte darum schon im Jahre 1796 [1]) das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten abzuleiten, indem er alle die auf die Elemente eines Körpers wirkenden Kräfte durch die Spannung eines, alle Punkte ein oder mehrere Male umschlingenden Seiles ersetzte und dann die algebraische Summe aller bei einer virtuellen Verrückung des Systemes entstehenden Verlängerungen und Verkürzungen der einzelnen Seilstrecken gleich Null setzte. Zur Veranschaulichung hatte er dabei jeden Punkt mit festen Rollen verbunden gedacht, wodurch das ganze System mit einem sehr zusammengesetzten Flaschenzuge Aehnlichkeit bekam. Doch gab er 1813 in der 2. Auflage seiner Théorie des fonctions (Cap. 5, Art. 30) auch diese Construction wieder auf und dachte sich nun die Rollen unendlich klein oder vielmehr die Seilfäden um die Körperelemente selbst ohne Reibung beweglich.

Indessen half auch das dem Principe nicht zu einer fundamental gesicherten Existenz. Dühring macht in seiner Geschichte der mechanischen Principien (2. Aufl., S. 317 bis 319) wieder darauf aufmerksam, dass auch dieser Beweis die Reduction der Kraft auf eine bestimmte Bewegungsrichtung noch voraussetze, und schon Jacobi sagt in seinen von Clebsch herausgegebenen Vorlesungen, von jedem Beweise absehend [2]): „Nach der Ansicht vieler Mathematiker, namentlich auch der von Gauss, ist der in Rede stehende Satz als ein Princip aufzufassen, von einer mathematischen Deduction also Abstand zu nehmen.“ Damit blieb auch diese erkenntnisstheoretische Frage, wie noch so manche andere, eine offene.

Der Entwickelung der gesammten analytischen Mechanik schliessen wir den Bericht über einzelne mechanische, oder die Mechanik nahe berührende Thatsachen an.

---

[1]) Journal de l'école polytechnique Cahier V, tome II, p. 115. Mécanique analytique, 2. Aufl., Bd. I, sect. I, art. 18 u. 19.

[2]) Nach H. Klein, die Principien der Mechanik, Leipzig 1872, S. 16.

Mechanik, c. 1790 bis c. 1810.

So ungünstig sich auch die Jahre der französischen Revolutionen, wie der nachfolgenden grossen Napoleon'schen Kriege den theoretischen Wissenschaften zeigten, so haben dieselben auch einen Nutzen gebracht, den ruhige Zeiten vielleicht nie oder erst in langer Zeit erreicht hätten, nämlich die Construction und die Durchführung eines einheitlichen planvollen Maasssystemes. 1788 und 1789 hatten viele Städte Frankreichs durch ihre Deputirten um ein gemeinsames Maass für das ganze Land gebeten, um viele Missbräuche und Betrügereien, die durch die verschiedenen Maasse hervorgerufen, unmöglich zu machen. In der Sitzung der Akademie vom 14. April 1790 schlug Brisson vor, das ganze Maasssystem auf eine natürliche Länge zu basiren, die leicht immer wieder gefunden werden könne. Talleyrand (damals Bischof von Autun) brachte dann die Sache vor die Nationalversammlung, und am 8. Mai 1790 beschloss dieselbe, die Länge des Secundenpendels unter dem 45. Breitengrade als unveränderliche Grundlage des Maasssystemes anzunehmen. Als Gewichtseinheit hatte Brisson das Gewicht eines bestimmten Volumens von Gold, Silber oder destillirtem Wasser vorgeschlagen, welch letzterem er später den Vorzug gab. Eine Commission der Akademie (bestehend aus de Borda, Lagrange, Laplace, Monge und Condorcet) entschied aber nicht für das Secundenpendel, sondern rieth, einem 1790 gemachten Vorschlage des Ingenieur-Geographen Bonne folgend, einen Theil des Aequators oder des Meridians als Maasseinheit anzunehmen, weil die Pendellänge von zwei ungleichartigen Elementen, der Schwere und der Zeit, deren Eintheilung noch dazu willkürlich sei, abhänge. Am 30. März 1791 wurde dann von der Nationalversammlung der zehnmillionste Theil des Erdmeridians als Einheit des Maasses festgesetzt. Méchain und Delambre begannen sogleich die hierzu nöthige Gradmessung. Die Arbeiten wurden 1792 durch Aufhebung der Akademie unterbrochen, doch nahm eine neu ernannte Commission (bestehend aus Berthollet, Borda, Brisson, Coulomb, Delambre, Hauy, Lagrange, Laplace, Méchain, Monge, Prony und Vandermonde) dieselben bald wieder auf und führte sie in einigen Jahren zu Ende. Ein Gesetz vom 18. Germinal des Jahres III (7. April 1795) setzte noch vor dem auf Grund älterer Messungen ein provisorisches Meter auf 3 Fuss 11,4421 par. Linien fest. Nach Beendigung der neuen Messungen wurden dann unter Aufsicht der neuen Commission, an deren Spitze Laplace stand, die Urmaasse angefertigt und am 4. Messidor des Jahres VII (23. Juni 1799) dem Archive der Republik einverleibt. Am 6. Messidor des Jahres VIII (25. Juni 1800) erschien das Gesetz, welches die neuen Maasse definitiv einführte. Das Meter war nun gleich 3 Fuss 11,2961 par. Linien. Leider entdeckte man später Rechenfehler in der Bestimmung des Bogens zwischen Montjouy und Formentera, auf der die Längenbestimmung des Meters beruhte. Puissant berichtigte zwischen 1836 und 1840 solche Fehler und bestimmte das Meter zu 3 Fuss 11,375 par. Linien. Bessel zeigte, dass ein Meridianquadrant, in dem

angenommenen Meter ausgedrückt, nicht 10 000 000, sondern 10 000 856 Meter gleich sei. Eine Commission der Akademie berieth danach über das Grundmaass von Neuem, kam aber zu dem Beschlusse, an dem einmal eingeführten Meter vom Jahre VIII festzuhalten, weil man auf dem eingeschlagenen Wege zu einem natürlichen Maasse in aller Strenge doch nie gelangen könne [1].

Mechanik, c. 1790 bis c. 1810.

Von sehr vielseitigem Interesse für Astronomen, Geographen und Physiker waren die um diese Zeit stattfindenden Versuche zur Bestimmung der Dichtigkeit der Erde. Da die aus der Rotationsgeschwindigkeit der Erde unter Annahme einer überall gleichen Dichte derselben berechnete Abplattung der Erde weder mit der durch Gradmessungen noch durch Pendelbeobachtungen am Aequator und Pol ermittelten Grösse derselben stimmten, so kam man zu der ganz natürlichen Annahme, dass die Dichte der Erdschichten im Inneren grösser sein müsse als an der Oberfläche. Doch wollte trotz der Anstrengungen der grossen Mathematiker eine Bestimmung dieser Dichtigkeit auf dem rechnenden Wege nicht gelingen. Erst Maskelyne [2] und Hutton [3] gelangten durch Beobachtungen zu einem einigermaassen annehmbaren Resultate. Nach des ersteren Vorschlag beobachteten dieselben die Ablenkung, welche das Bleiloth zu beiden Seiten der Bergkette Shehallien in Pertshire erfuhr und berechneten daraus während der Jahre 1774, 1775 und 1776 das Verhältniss der Dichten der Erde und des Berges auf 17804 : 9938. Hutton nahm zuerst die Dichte des Berges zu $2^1/_2$, dann aber nach Angaben des Macara von Fortingal zu 3 an. Danach ergab sich die Dichte der Erde zu 4,481 oder 5,377; zuletzt hielt Hutton den Mittelwerth 4,929 aus beiden Zahlen für richtig. Immerhin war die Ableitung dieser Zahlen voll so vieler Fehlerquellen, dass man es freudig begrüssen musste, als Henry Cavendish [4] auf ganz anderem Wege zu abweichenden, aber doch nicht widersprechenden Resultaten gelangte [5]. Er bestimmte im Jahre 1798 mit Hülfe der Drehwage (die noch vor Coulomb von John Michell im Jahre 1768 geplant sein soll) das specifische Gewicht der Erde auf 5,48. Der Balken der Wage, welcher an versilbertem Kupferdraht hing, war dabei 36,65 Zoll nach jeder Seite lang und wog im Ganzen 2400 Gran. Er trug an seinen Enden kleinere Bleikugeln (von 2 Zoll Durchmesser), denen in einer Entfernung von 8,85 Zoll grössere (8 Zoll im Durchmesser haltende) Bleikugeln gegenüberstanden. Cavendish stellte vom 5. August 1797 bis 23. Mai 1798 im Ganzen 17 Versuche an und berechnete aus den durch die grossen Bleikugeln

---

[1]) Gehler, phys. Wörterb., 2. Aufl., VI, S. 1261. Chevreul, Examen critique de l'histoire du mètre. Compt. rend. LXIX, p. 847—853.

[2]) Nevil Maskelyne, 1732 bis 1811, königl. Astronom in Greenwich.

[3]) Charles Hutton, 1737 bis 1823, Professor der Mathematik.

[4]) 1731 bis 1810, sehr vermögender Mann, der ganz den Wissenschaften Physik und Chemie lebte.

[5]) Philosoph. Trans. LXXXVIII, p. 469. Gilbert's Annalen II, S. 1.

Mechanik, c. 1790 bis c. 1810.

verursachten Ablenkungen des Wagebalkens, wie aus der Schwingungsgeschwindigkeit des letzteren, die oben angegebene Zahl für die Dichtigkeit der Erde. Die Zahl weicht ziemlich stark von der früher erhaltenen ab. Cavendish wie auch Hutton versuchten den Grund dieser Abweichungen zu entdecken, jedoch ohne Erfolg. Da aber in den Rechnungen des Cavendish häufiger Fehler sich zeigten, und da endlich auch Laplace aus der Abplattung der Erde und der Veränderlichkeit der Gravitation die der Hutton'schen näher kommende Zahl 4,761 für die Dichte des Erdkerns herausrechnete, so nahm man schliesslich den aus einer von Playfair 1811 unternommenen Revision der Hutton'schen Messungen hervorgehenden Werth 4,713 als die wahrscheinlichste Zahl für die Dichte der Erde an.

Nach längerer Pause griff man auch die Versuche über den freien Fall der Körper auf der Erde wieder auf. Im Jahre 1784 beschrieb George Atwood (1745 — 1807) seine Fallmaschine in der Schrift On the rectilinear motion and rotation of bodies. Von 1789 an begann Giovanni Battista Guglielmini († 1817) seine Arbeiten über die Abweichung fallender Körper von der Lothlinie, die schon von Newton verkündet, aber bis dahin nicht constatirt worden war. Er berechnete damals die östliche Abweichung, welche ein von der St. Peterskirche in Rom 240 Fuss hoch herabfallender Körper durch die Rotation der Erde erhalten müsste, auf $^1/_2$ Zoll von der Verticalen. 1790 und 1791 beobachtete er dann an dem Thurme degli Asinelli zu Bologna, den schon Riccioli und Grimaldi zu Fallversuchen benutzt, den Weg fallender Kugeln und diese Versuche ergaben Resultate, die mit den Resultaten seiner Rechnung ziemlich gut übereinstimmten. Wunderbarerweise aber fand Guglielmini mehr als er erwartet hatte, nämlich ausser der östlichen Abweichung auch eine allerdings geringe südliche[1]). Laplace schloss aus dieser Abweichung, die ihm theoretisch unmöglich erschien, nur, dass die ganzen Versuche gänzlich ungenau und ihr Zeugniss für die Achsendrehung der Erde ein ganz unkräftiges sei. Benzenberg[2]) aber hielt es für möglich, dass trotzdem die Versuche Guglielmini's brauchbar sich erweisen könnten und dass die südliche Abweichung nur daher rühre, dass Guglielmini erst sechs Monate nach den Versuchen seine senkrechte Linie verificirt und der Thurm sich während der Zeit um einige Linien gezogen habe[3]). Er beschloss, die Versuche ganz in derselben Art, nur mit grösserer Vorsicht und vor Allem innerhalb eines Gebäudes, wo äussere Einflüsse mehr ausgeschlossen, zu wiederholen. Zu diesem Zwecke fand er den Michaelisthurm in Hamburg, dessen Zwischenböden sich für den Durch-

---

[1]) Guglielmini, De diurno terrae motu, experimentis physico-mathematicis confirmato, Bologna 1792.

[2]) Johann Friedrich Benzenberg, 1777 — 1846; von 1805 bis 1810 Professor der Physik und Mathematik am Lyceum in Düsseldorf, lebte danach als Privatmann; Stifter der Sternwarte Bilk bei Düsseldorf.

[3]) Gilbert's Ann. XII, S. 372.

gang der fallenden Körper öffnen liessen, vorzüglich geeignet. Hier stellte er im Jahre 1802 bei einer Fallhöhe von 235 par. Fuss mit Kugeln aus Blei oder aus einer Legirung von Zinn, Zink und Blei 31 Versuche an. Er erhielt, mit der Theorie übereinstimmend, eine östliche Abweichung von im Mittel 3,99 oder nach Gauss' Berechnung 3,95 Pariser Linien; aber auch bei seinen Versuchen zeigte sich wieder die ominöse südliche Abweichung, und zwar um 1,5''' par. grösser als die mögliche Fehlergrenze. Aehnliche Ergebnisse hatten die Versuche, welche Benzenberg während des nächsten Jahres in einem Kohlenschachte zu Schlehbusch in der Mark anstellte. Danach hielt er doch für möglich, dass eine bei den theoretischen Entwickelungen übersehene natürliche Ursache diese südliche Abweichung bewirken könnte[1]. Andere aber, wie der Astronom Olbers, erklärten diese Abweichung fortdauernd durch Nebenumstände, die, von der Schwere und der Rotation der Erde unabhängig, wahrscheinlich durch nicht ganz abgesperrte Luftströmungen hervorgerufen seien. Dieser Meinung schlossen sich vor der Hand die meisten Physiker an, trotzdem es immerhin wunderbar blieb, dass der Luftzug oder andere zufällige Nebenumstände die Körper in Bologna, wie in Hamburg, wie in Schlehbusch von der Lothlinie nur nach Süden abdrängten.

Mechanik, c. 1790 bis c. 1810.

Mehrere theoretisch oder technisch wichtige mechanische Apparate verdanken dieser Zeit ihre Entstehung. Die Brückenwage erhielt um 1800 durch den Mechaniker Schwilgué in Strassburg (den Verfertiger der neuen Uhr im Strassburger Münster) ihre jetzige Gestalt, nachdem man seit langer Zeit unter dem Namen der schwedischen Schiffswage ein System von Hebeln gebraucht, das mit kleinen Gewichten grosse Lasten zu wägen erlaubte.

Jos. Michel Montgolfier liess 1796 zur Förderung des Wassers bei seiner Papierfabrik zu Voiron eine Maschine erbauen, der er den Namen Bélier hydraulique gab, die wir noch in der wesentlich gleichen Einrichtung unter dem Namen Stossheber kennen. Diese Maschine erregte bald das Interesse technischer, wie wissenschaftlicher Kreise in hohem Maasse. Montgolfier erhielt 1802 ein Brevet d'invention und eine goldene Medaille. Die Jablonowski'sche Gesellschaft, die batavische Gesellschaft zu Rotterdam und die Berliner Akademie setzten Preise für die theoretische Behandlung des Stosshebers aus, und fortdauernd erschienen im ersten Jahrzehnt des neuen Jahrhunderts wissenschaftliche Abhandlungen zur besseren Erläuterung desselben. Trotzdem aber kam die Maschine doch nicht zu bedeutenderen Anwendungen in der Technik, vor Allem darum, weil die Berechnung derselben, besonders des wichtigsten Ventils im Zuleitungsrohre und damit einer Construction, welche tadellosen Gang gewährleistete, zu schwierig sich zeigte.

---

[1] Benzenberg, Versuche über die Gesetze des Falles, den Widerstand der Luft und die Umdrehung der Erde. Hamburg 1804.

Mechanik, c. 1790 bis c. 1810.

Das entgegengesetzte Schicksal hatte die Erfindung Joseph Brahma's (Mechaniker und Ingenieur in London, 1749 bis 1814), der im März 1796 ein Patent auf die nach ihm benannte hydraulische Presse erhielt. Noch bis zum Jahre 1820 war ihre Construction in England und Frankreich nur mangelhaft bekannt; in Deutschland theilte Gilbert (Gilbert's Ann. LX, S. 1) zuerst im Jahre 1818 eine genaue Beschreibung derselben mit. Danach ist ihre Verbreitung stetig gewachsen [1]). Auch Pierre François Réal soll seine Extractpresse schon 1806 und zwar zur Bereitung eines besonders concentrirten Kaffeeextractes erfunden haben; bekannt wurde dieselbe erst um das Jahr 1817 durch den Chemiker Döbereiner, der diese Presse sehr warm empfahl.

Endlich haben wir noch die Theorie der Capillarität zu erwähnen, die am Anfange des neuen Jahrhunderts durch Laplace zu einem gewissen Abschlusse gelangte, nachdem über $1^1/_2$ Jahrhunderte schon die meisten Physiker fast ohne Erfolg sich um dieselbe bemüht. Wir haben im zweiten Bande dieses Werkes gesehen, dass man am Anfange des XVII. Jahrhunderts das Steigen der Flüssigkeiten in engen Röhren auf die Anziehung der Wände dieser Röhren gegen die Flüssigkeit zurückgeführt und damit den Luftdruck aus dieser Angelegenheit glücklich eliminirt hatte. Mit dieser negativen That war aber für die Theorie der Capillarität noch nicht viel gewonnen, denn es wollte durchaus nicht glücken, diese Ursache mit ihrer Wirkung in einen auch quantitativ richtig bestimmten Zusammenhang zu bringen. Carré [2]) meinte um das Jahr 1705, die Wassertheilchen verlören durch die Anziehung der Röhrenwände ihr ganzes Gewicht, es müsse daher die in der Röhre befindliche Flüssigkeitsmenge durch eine andere ganz gleiche Quantität ersetzt werden, und die Steighöhe müsse also der Länge der eingetauchten Röhre proportional sein. Jurin und Bülfinger vertheidigten einige Jahrzehnte später ganz ähnliche Ansichten. Hamilton schrieb die Anziehung nur dem unteren Rande der Röhre zu, weil ein Tropfen in einer horizontal gehaltenen Röhre sich leicht nach jeder Seite bewege und nur am Rande derselben hängen bleibe. Nach Musschenbroeck scheint der Effect der Capillarität abzuhängen: 1) von der Anziehung der Wände des Flüssigkeitscanales, 2) von der Anziehung der kleinsten Theile der Flüssigkeit selbst und 3) von dem Gewichte der Flüssigkeit

---

[1]) Eine interessante Variation dieser Maschine haben die Ingenieure Desgoffe und Ollivier im Jahre 1865 versucht. Dieselbe besteht nur aus einem mit einem Kolben versehenen Presscylinder, der ganz mit Oel angefüllt ist. In dem Cylinder befindet sich eine Walze, auf welche man durch eine aussen angebrachte Kurbel eine starke Darmsaite aufwickeln kann, die natürlich, wie auch die Achse der Kurbel, öldicht durch die Cylinderwand geht. (Jahrb. d. Erfindungen II, S. 156.)

[2]) Louis Carré (1663 bis 1711, Copist bei Malebranche, dann Privatlehrer in Paris), Sur les tuyaux capillaires, Mém. Par. 1705.

in der Röhre und von der Höhe derselben. Doch mag dieser sich auf eine theoretische Bestimmung nicht einlassen, weil er die Natur jener Anziehungskräfte nicht kennt. Er giebt nur eine Tabelle der Steighöhen verschiedener Flüssigkeiten bei sehr verschiedenen Glassorten [1]). Eine analytische Entwickelung der Gesetze der Capillarität hatte Clairault zuerst in seiner Schrift De la figure de la Terre (Paris 1743) versucht, dabei aber noch die Annahme zu Grunde gelegt, dass die Anziehung der Röhrenwände sich bis in die Achse der Röhre erstrecke. Die neuere Vorstellung, nach welcher die Molecularanziehung nur bis in unendlich kleine Entfernungen merklich ist, benutzte nun Laplace bei seiner Theorie der Capillarität und brachte erst dadurch die Resultate der Mathematik mit denen der Beobachtung zur Uebereinstimmung. Laplace veröffentlichte die betreffenden Arbeiten in zwei kleinen Schriften: Théorie de l'action capillaire (Paris 1806) und Supplément à la théorie de l'action capillaire (ib. 1807), denen übersichtlichere Darstellungen in verschiedenen Zeitschriften folgten [2]). Danach werden die Erscheinungen der Capillarität bewirkt durch die Cohäsion der Flüssigkeitstheilchen unter sich und die Adhäsion zwischen diesen Theilchen und denen der festen Röhrenwände, welche Kräfte aber beide nur bei unmessbar kleiner Entfernung der Theilchen noch merkbar sind. Je grösser die Adhäsion im Verhältniss zur Cohäsion, desto mehr wird die den Rand der Röhre berührende Schicht sich über das mittlere Niveau erheben. Das Verhältniss der Cohäsion zur Adhäsion lässt sich aus der Form der Flüssigkeitsoberfläche oder bestimmter aus dem Winkel, welchen die Flüssigkeitsoberfläche mit der Fläche der Wand bildet, dem sogenannten Randwinkel, erschliessen und umgekehrt. Damit wird die Gestalt der Oberfläche oder der Randwinkel das maassgebende Element für die Steighöhe, mit Hülfe dessen man statt der unfassbaren Molecularkräfte die Erscheinungen der Capillarität mathematisch bestimmen kann. In der That wurde es Laplace nicht schwer, mit Hülfe des Princips vom constanten Randwinkel das Grundgesetz der Capillarerscheinungen, nach dem die Steighöhe bei denselben Materien den Durchmessern der Röhre proportional sein muss, abzuleiten und dadurch diesem Theile der Wissenschaft die Grundlage zu geben, die er auch in seiner Fortentwickelung nicht wieder zu verlassen brauchte.

Mechanik, c. 1790 bis c. 1810.

---

1) Musschenbroeck, Introductio ad Philosoph. Natur. I., p. 368—376. Musschenbroeck führt schon das Aufsteigen des Saftes in den Pflanzen auf die Capillarität zurück.

2) Die Theorie der Capillarität erschien auch als Supplement zu dem 4. Bande der Mécanique céleste. Eine Bearbeitung derselben von Biot findet sich in Gilbert's Annalen XXV, 1807, S. 345; eine vollständige Darstellung der bis dahin erschienenen Arbeiten von Laplace über Capillarität geben Gilbert und Brandes in Gilb. Ann. XXXIII, 1809, S. 1.

Thermische Ausdehnung, Wärmeleitung, c. 1800 bis c. 1815.

Die Beobachtung, dass Temperaturveränderungen der Körper auch immer Volumenveränderungen derselben erzeugen, ist uralt, trotzdem aber sind alle Bestimmungen der absoluten Grösse der Verhältnisse dieser Veränderungen ganz neuen Datums. Vor der Erfindung der Thermometer war natürlich an eine solche Bestimmung nicht zu denken, umgekehrt aber wurde mit der Ausbildung der Thermometrie eine genaue Untersuchung des Zusammenhanges jener Veränderungen auch immer nothwendiger. Ausserdem drängten Ende des vorigen und Anfang dieses Jahrhunderts zu vollkommeneren Messungen der **Ausdehnung durch die Wärme** noch eine Menge Umstände: die nothwendige Reduction der Barometerbeobachtungen für das Höhenmessen, die Bestimmung der astronomischen Strahlenbrechung, die Frage nach der Elasticität der Gase und Dämpfe, die immer stärker werdende Benutzung der Metalle für wissenschaftliche Instrumente und technische Maschinen u. s. w.

Zuerst wandte man sich natürlich der Bestimmung der Ausdehnung der Luft zu, die bei ihrer Grösse am meisten auffiel und am leichtesten messbar schien. Eine Menge von Physikern aber gab auch eine Menge zum Theil recht verschiedener Resultate. Amontons maass zur Regulirung seines Normalthermometers die Ausdehnung der Luft bei einer Erwärmung von $0^0$ auf $80^0$ R. verhältnissmässig genau auf 0,380 Thle. ihres Volumens bei $0^0$. Nuguet dagegen fand 1705 mit etwas abgeänderten Apparaten einmal das Doppelte, ein andermal sogar das 16 fache, und auch La Hire (1708) erhielt statt der Zahl des Amontons 1,5 oder auch 3,5. Hawksbee gab (1709) 0,455; Crucquius (1720) 0,411; Poleni 0,333; Bonne 0,462; Musschenbroeck 0,500; Lambert (Pyrometrie, S. 47) 0,375; Deluc 0,372; J. T. Mayer 0,3755 und 0,3656; Saussure 0,339; Vandermonde, Berthollet und Monge erhielten (1786) 0,4328. Priestley[1]), der für die Ausdehnung der Luft wieder die sehr abweichende Zahl 0,9375 fand, behauptete ausserdem, dass Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Salpetergas, Kohlensäure, salzsaures, schwefligsaures, flusssaures und Ammoniakgas alle in ihren Ausdehnungen von der Luft verschieden seien. G. G. Schmidt (Gren's Neues Journal IV, S. 379) erhielt für die Ausdehnung der Luft die Zahl 0,3574, für Sauerstoff 0,3213, für Wasserstoff und Kohlensäure und Stickstoff endlich 0,4400 und 0,4352 und 0,4787. Morveau und Duvernois schlossen sich Priestley an, fanden aber überhaupt die Ausdehnung der Gase nicht ganz den Maassen der Temperatur proportional[2]).

Einen Entscheid über diese abweichenden Resultate und widersprechenden Ansichten, eine klare und allgemein anerkannte Anschauung von der Ausdehnung der Gase durch die Wärme brachten erst die Arbeiten Gay-Lussac's und Dalton's, die gleichzeitig und doch unab-

[1]) Experiments and observations on different kinds of air. London 1774—1777.

[2]) Vergl. Gehler's physik. Wörterbuch, 2. Auflage, I, S. 626 bis 632.

hängig von einander zu übereinstimmenden Resultaten gelangten. Gay-Lussac[1]) suchte die Ursache der vielen vor ihm erhaltenen fehlerhaften Ausdehnungscoëfficienten vor Allem in der Anwesenheit von Wasser in den zur Messung benutzten Gefässen, das bei der Erwärmung verdampfend das Volumen der abgesperrten Luftarten in unberechenbarer Weise vergrösserte. Er war darum ängstlich bemüht, seine Gefässe vor der Benutzung gänzlich auszutrocknen und auch die betreffende Luft von aller Feuchtigkeit zu befreien. Danach erhielt er schon in einer ersten Versuchsreihe sehr gut übereinstimmende Resultate. Sechs mit atmosphärischer Luft angestellte Versuche ergaben die Ausdehnung derselben zwischen $0^0$ und $100^0$ C. zu 0,3740; 0,3760; 0,3744; 0,3755; 0,3748; 0,3757; also im Mittel 0,3750; ein Werth, der nicht mehr als $^1/_{1000}$ von jedem Einzelresultate abwich. Entsprechende Versuche brachten für Wasserstoffgas die Zahlen 0,3749 und 0,3756; für Sauerstoff 0,3747; 0,3754 und 0,3745; für Stickstoff 0,3742; 0,3756; 0,3750; 0,3746 und 0,3755[2]). Das Resultat seiner Versuche sprach Gay-Lussac in den Worten aus: „Die Experimente, welche ich soeben beschrieben und welche ich mit grosser Sorgfalt angestellt habe, beweisen offenbar, dass atmosphärische Luft, Oxygen, Hydrogen, Stick-

Thermische Ausdehnung, Wärmeleitung, c. 1800 bis c. 1815.

---

[1]) Louis Joseph Gay-Lussac ist am 6. December 1778 in St. Léonard (Limousin) geboren. 1795 Zögling der polytechnischen Schule, 1800 Gehülfe im Laboratorium Berthollet's, 1802 Repetent und 1809 Professor der Chemie an der polytechnischen Schule, 1808 auch Professor der Physik an der Sorbonne, später Professor der Chemie am Jardin des Plantes; daneben Mitglied mehrerer technischer Behörden. Am 24. August 1804 machte Gay-Lussac mit Biot und am 16. September 1804 allein die berühmten wissenschaftlichen Luftreisen zur Beobachtung der Veränderungen der Temperatur, des Feuchtigkeitsgehaltes und der chemischen Zusammensetzung der Luft, sowie des Erdmagnetismus mit der Höhe. 1805 bis 1806 bereiste Gay-Lussac mit A. v. Humboldt Italien und einen Theil von Deutschland. 1807 wurde er Mitglied der berühmten Société d'Arcueil, welche der berühmte Chemiker Berthollet in diesem Jahre gründete, und die nur aus einer geringen Anzahl von wissenschaftlichen Freunden des letzteren bestand. 1808 wies er nach, dass Gase sich chemisch nach einfachen Volumenverhältnissen verbinden. 1813 erkannte er Jod als Element, 1815 entdeckte er das Cyan. 1816 beschrieb er das nach ihm benannte Barometer, 1822 beschäftigte er sich mit dem Schweben der Wolken, 1823 mit den vulcanischen Erscheinungen. Den Anfang eines Werkes, „Philosophie der Chemie“, von dem die ersten Capitel vollendet waren, liess er kurz vor seinem Tode verbrennen. Gay-Lussac starb am 9. Mai 1850 in Paris. Mit Arago gab er die bedeutendste physikalisch-chemische Zeitschrift Frankreichs, Annales de chimie et de physique, heraus.

[2]) Annales de chimie et de physique XLIII, 1802, p. 137. Auch Gilbert's Annalen XII, S. 257. Gay-Lussac erwähnt, dass Charles (der Erfinder der Charlièren) 15 Jahre vor ihm die Gleichmässigkeit der Ausdehnung bei den hauptsächlichsten Gasen bemerkt, aber seine Beobachtung nie veröffentlicht hat. Charles hatte das Gefäss eines Barometers mit dem zu untersuchenden Gase angefüllt, dasselbe einmal der Temperatur der Umgebung, das andere Mal der des kochenden Wassers ausgesetzt und den Stand des Quecksilbers dabei beobachtet.

Thermische Ausdehnung, Wärmeleitung, c. 1800 bis c. 1815.

luft, Salpeter-, Ammoniakal-, Salz-, Schwefel- und kohlensaure Gase sich bei gleichem Zuwachs der Temperatur auch gleichförmig ausdehnen, so dass also das Resultat der Ausdehnung nicht von den physischen Eigenschaften, von der besonderen Natur dieser Körper abhängt und, wie ich daraus schliesse, dass alle Gase durch die Wärme in gleichem Grade ausgedehnt werden."

Dalton [1]), der sich noch etwas früher als Gay-Lussac mit demselben Gegenstande beschäftigt hatte, veröffentlichte seine Resultate theilweise noch im Jahre 1801 [2]). Er beobachtete die Ausdehnung, welche durch Schwefelsäure getrocknete Luft bei ihrer Erwärmung in graduirten Röhren erlitt, und fand für eine Temperaturerhöhung von 157° F. diese Ausdehnung zu 0,321 des ursprünglichen Volumens, und wenn er die Ausdehnung des Gases mit 0,004 in Berechnung brachte, zu 0,325. Eine gleichmässige Ausdehnung der Luft angenommen, giebt dies für die Ausdehnung der Luft zwischen den beiden festen Punkten des Thermometers 0,373. Später [3]) nach wiederholten Versuchen gab Dalton als Gesammtresultat seiner Messungen die Zahl 0,376 und zwar nicht nur in Bezug auf Luft, sondern für alle Gase und sogar für alle Dämpfe. Danach wurde der Ausdehnungscoëfficient der Gase allgemein zu 0,375 angenommen, und das Gesetz, welches die Gültigkeit dieses Coëfficienten für alle expansiblen Flüssigkeiten behauptete, erhielt billigerweise den Namen des Dalton-Gay-Lussac'schen. Doch hatte Dalton sich das Gesetz in etwas anderer Weise gedacht als Gay-Lussac, und als es schliesslich angenommen wurde. Er stimmte zwar mit Gay-Lussac darin überein, dass er allen Gasen die gleiche Ausdehnung zuschrieb, hatte aber diese Ausdehnung nicht gleichmässig angenommen und vielmehr behauptet, dass die Ausdehnung jedes permanenten Gases in einer geometrischen Progression zunähme, wenn die Wärme in arithmetischer Proportion wachse. Aber auch die Gay-Lussac'sche Fassung des Gesetzes erhielt noch eine Einschränkung. Dalton, wie Gay-Lussac, hatten beide die Gültigkeit ihres Gesetzes von allen Gasarten, den permanenten wie den coërciblen, in gleicher Weise behauptet; spätere Versuche aber ergaben, dass diese letzteren, wenn

---

[1]) John Dalton, geboren am 5. September 1766 in Eaglesfield (Cumberland) als Sohn eines armen Wollenwebers, war zuerst Hülfslehrer und von 1785 an mit seinem Bruder Jonathan Vorsteher einer Schule in Kendal. 1793 wurde er Lehrer der Mathematik und Physik am New-College in Manchester. Später ertheilte er Privatunterricht in diesen Fächern und hielt Vorlesungen in den bedeutendsten Städten Englands und Schottlands. Er starb am 27. Juli 1844 in Manchester. Dalton war auswärtiges Mitglied der Pariser Akademie.

[2]) Nicholson's Journal V, 1801. Mem. of the Lit. a. Phil. Soc. of Manchester V, pt. II, p. 595; Gilbert's Annalen (Ueber die Ausdehnung der expansiblen Flüssigkeiten durch die Wärme) XII, S. 310. Die Abhandlung wurde schon Anfang 1801 vor der Manch. Soc. gelesen.

[3]) A new system of chemical philosophy, London 1808 (2. Aufl. 1842,) I, p. 44.

Thermische Ausdehnung, Wärmeleitung, c. 1800 bis c. 1815.

sich ihre Temperatur so weit verringert, dass sie dem Flüssigwerden nahe kommen, mehr oder weniger in ihren Volumenveränderungen von dem allgemeinen Gesetze abweichen, so dass das Gesetz für coërcible Gase nur bei Temperaturen, die weit von dem Condensationspunkte derselben entfernt liegen, Gültigkeit behält.

Ueberhaupt zeigten diese coërciblen Gase oder Dämpfe recht verwickelte Erscheinungen. Es ist klar, dass das Dalton-Gay-Lussac'sche Gesetz für coërcible Gase selbst annäherungsweise nur gelten kann, wenn sie vollständig von jeder Vermehrung abgeschlossen sind; denn sowie sie mit der Flüssigkeit, aus der sie abdampfen, noch in Verbindung stehen, kann nicht vom Volumen einer bestimmten Dampfmenge bei einer bestimmten Temperatur die Rede sein, weil sich ja diese Menge mit steigender Temperatur ständig vergrössert. Dämpfe, die noch mit der Flüssigkeit in Berührung, bleiben bei jeder Temperatur gesättigt, und Volumen- und Spannungszunahme solcher gesättigten Dämpfe müssen einem ganz anderen als dem Dalton-Gay-Lussac'schen Gesetze folgen. Die Bestimmung des Druckes dieser gesättigten Dämpfe für verschiedene Temperaturen ist aber für die Benutzung des Dampfes zur Leistung mechanischer Arbeit, wie auch für meteorologische Probleme von besonderer Wichtigkeit, und so haben sich nicht wenige Physiker um die Lösung dieses Problems, wie um die Bestimmung des Ausdehnungscoëfficienten der Gase bemüht.

Ausgedehntere Versuche über die Elasticität des Wasserdampfes machte zuerst Ziegler aus Winterthur im Jahre 1769 bekannt[1]). Doch stimmten die verschiedenen Versuchsreihen in ihren Resultaten nicht gut überein. Bessere Erfolge erzielte James Watt in den Jahren 1764 und 1765 und später 1773 und 1774, indem er für höhere Temperaturen wieder wie Ziegler den Papin'schen Topf, für niedere Temperaturen aber das Barometer gebrauchte, dessen oberen Theil er mit einem Heizgefässe umgeben und in dessen Leere er etwas Wasser gebracht hatte[2]).

Bétancourt[3]) versah um 1792 den Papin'schen Topf mit einem offenen Manometer von der noch gebräuchlichen Form. Seine sehr zahlreichen Versuche sind vor Allem dadurch merkwürdig, dass Prony (Nouvelle architecture hydraulique, Paris 1790 und 1796) eine erste allgemeine Formel zur Berechnung der Spannkraft aus der Temperatur auf dieselben zu gründen versuchte, eine Formel, die sich aber mehr durch Unbequemlichkeit als grosse Genauigkeit auszeichnete. Nur

---

[1]) Johann Heinrich Ziegler (1738—1818): Specimen phys.-chem. de digestore Papini, Basel 1769.

[2]) Watt's Zusätze zu Robison's mechanical philosophy, II, p. 29. Nach Gehler's Wörterb. II, S. 317.

[3]) Augustin de Bétancourt (1760—1826, Militär): Mém. sur la force expansive de la vapeur de l'eau et de l'esprit du vin, Paris 1792.

Thermische Ausdehnung, Wärmeleitung, c. 1800 bis c. 1815.

wenig später stellten auch G. G. Schmidt in Giessen, sowie L. Biker und H. W. Rouppe in Rotterdam sorgfältige Versuche zur Ermittelung der Elasticität des Wasserdampfes an [1]). Allgemeine Anerkennung aber erlangten für längere Zeit erst die Versuche Dalton's. Dieser brachte eine 2 bis 3 Linien hohe Schicht der Flüssigkeit, deren Dämpfe er untersuchen wollte, in die Torricelli'sche Leere eines Gefässbarometers. Ueber das Ende der Barometerröhre schob er zum Erhitzen der Flüssigkeit eine weitere Glasröhre, die unten durch einen Kork ganz, oben aber nur halb geschlossen war, damit Wasser von verschiedener Temperatur eingegossen werden konnte. Zur Bestätigung der so ausgeführten Versuche liess Dalton die Flüssigkeiten auch unter der Luftpumpe bei verschiedenen Verdünnungen der Luft sieden. Zur Messung von Spannkräften, die den Druck einer Atmosphäre überstiegen, benutzte er ein Heberbarometer, in dessen kürzeren geschlossenen Schenkel er die zu untersuchende Flüssigkeit brachte, während der längere Schenkel offen war [2]). Muncke (Gehler's phys. Wörterb., 2. Aufl., II, S. 328) spricht sich recht geringschätzig über die Apparate Dalton's aus: „Das Unzweckmässige dieses Apparates fällt sogleich in die Augen, und es ist fraglich, ob Dalton nicht die meisten seiner Resultate ... (nur) vermittelst der Luftpumpe erhalten hat." Man hat auch sonst darauf aufmerksam gemacht, dass die Temperatur des Heizwassers in Dalton's Apparaten nicht gleichmässig und unsicher zu bestimmen sei. Trotzdem aber haben sich seine Resultate doch brauchbar bewiesen, und Biot gründet noch die Tabelle, welche er in seinem Lehrbuche der Experimentalphysik (I, S. 259) für die Spannung der Wasserdämpfe giebt, ganz auf die Versuche Dalton's.

Weniger Erfolg hat dagegen der Versuch Dalton's gehabt, die Spannkräfte der Dämpfe verschiedener Flüssigkeiten unter ein allgemeines Gesetz zu bringen. Er meinte durch seine Versuche wenigstens für Schwefeläther, Alkohol, flüssiges Ammoniak, flüssigen salzsauren Kalk, schweflige Säure und Quecksilber bewiesen zu haben, dass für gleiche Temperaturen unter oder über dem Siedepunkte der betreffenden Flüssigkeiten allen Dämpfen gleiche Elasticitäten zukommen und glaubte dann den Satz auch auf alle Flüssigkeiten ausdehnen zu dürfen. Doch wurde dieses vermeintliche Gesetz von den gleichzeitigen Physikern nur mit Misstrauen aufgenommen, und später zeigten Despretz, Ure u. A., dass dasselbe, wenn auch für einige Dämpfe nahezu gültig, doch im Allgemeinen sicher unrichtig ist.

Besser hielt, trotz auch hier nicht fehlender Angriffe, Dalton's Ansicht von der Mischung von Gasen und Dämpfen der Prüfung

---

[1]) Gilbert's Ann. X, S. 257.

[2]) Mem. of the Lit. and Phil. Soc. of Manchester V, pt. II, p. 550. Gilbert's Annalen XV, 1803, S. 1. Ausführliche Referate über die obigen Arbeiten auch in Fischer's Geschichte der Physik VII, S. 509, und Gehler's physik. Wörterbuch II, S. 316.

Stand. Dalton erkannte, dass Gase, die in irgend einer Weise in Verbindung gesetzt werden, sich mit einander mischen und vollständig durchdringen, auch wenn der Druck in beiden gleich sein oder die Schwere des einen Gases dieser Durchdringung entgegen wirken sollte; dass also ein Gas sich in einem Raume, der mit einem anderen Gase gefüllt ist, wenn es zu demselben Zutritt erlangt, so in diesem ausbreitet, als wäre das zweite Gas gar nicht vorhanden. Die Anwesenheit des einen Gases hindert also das Eindringen eines anderen in denselben Raum nicht weiter, als dass es dieses verlangsamt, und der Druck des Gasgemisches ist, auf gleiches Volumen reducirt, gleich der Summe der Drucke der einzelnen Gase, vorausgesetzt, dass die Gase nicht chemisch auf einander wirken. Diesen Satz dehnte er dann auch auf die Mischung eines Gases und eines Dampfes und sogar von Dämpfen unter einander aus. Er führte für die Richtigkeit dieser Verallgemeinerung vor Allem an, dass in einem mit Luft gefüllten Raume die Flüssigkeiten gerade so stark verdampften und somit die Elasticität gerade so stark vermehrt werde als unter entsprechenden Umständen in der Torricelli'schen Leere und dass dabei die Dichtigkeit der Luft von keinem Einflusse auf die Elasticität der Dämpfe wäre [1]). Für dieses Dalton'sche Diffusionsgesetz der Gase und Dämpfe trat Gay-Lussac [2]) kräftig ein, der durch einen feinen und sinnreichen Apparat die Gültigkeit desselben wenigstens für atmosphärische Luft und Dämpfe sicher nachwies. Auch Biot nahm in seinem Lehrbuche der Physik (I, S. 271 bis 277) das Gesetz ohne Be-

Thermische Ausdehnung, Wärmeleitung, c. 1800 bis c. 1815.

---

[1]) Dalton: „Ueber das Bestreben elastischer Flüssigkeiten, sich durch einander zu verbreiten"; aus Memoirs of the lit. and phil. Soc. of Manchester, New. Ser., vol. I, übersetzt in Gilbert's Ann. XXVII, 1807, S. 388 bis 399. Verschiedene Flaschen wurden, zu je zwei, durch 10 Zoll lange und $^1/_{20}$ Zoll weite Glasröhren, die luftdicht durch Korke gingen, so verbunden, dass die untere Flasche, die stets die schwerere Gasart enthielt, aufrecht stand, die obere aber verkehrt, senkrecht darüber. Bei einem Versuche enthielt die untere Flasche Kohlensäure, die obere Wasserstoff, Stickgas oder Salpetergas; bei einem zweiten enthielt die untere Wasserstoffgas, die obere atmosphärische Luft oder Sauerstoff; bei einem dritten endlich enthielt die untere Salpetergas, die obere Sauerstoff, atmosphärische Luft oder Wasserstoff. Immer aber zeigten nach einigen Stunden beide Flaschen Gemische der betreffenden Gase. Diese Versuche, sagt Dalton, „scheinen es mir ausser allem Zweifel zu setzen, dass zwei elastische Flüssigkeiten, welche man mit einander in Berührung bringt, sich stets mit einander vermischen, auch wenn man alle Bewegung in ihrem Inneren sorgfältig vermieden hat, . . . und scheinen mir die merkwürdige Thatsache darzuthun, dass eine leichtere elastische Flüssigkeit nicht über einer schweren abgesondert zu stehen vermag . . ., sondern dass beide beständig sich durch einander zu verbreiten streben . . ., ohne dass ihr specifisches Gewicht einen anderen Einfluss dabei hat, als dass es die Wirkung beschleunigt oder verlangsamt."

[2]) Gehler's phys. Wörterb., II, S. 401.

Thermische Ausdehnung, Wärmeleitung, c. 1800 bis c. 1815.

denken an, und danach ist es für die Mischung von Gasen und Dämpfen auch weiter bestätigt worden. Für Mischungen von Dämpfen unter einander dagegen hat es sich nur bewährt, wenn die Flüssigkeiten, aus denen die Dämpfe stammen, sich nicht mit einander mischen. Bei anderen Dämpfen, wie Magnus und Regnault später zeigten, ist der Druck der Mischung nur nahezu proportional der Summe der einzelnen Drucke.

Mit der Constatirung des Dalton'schen Gesetzes wurde das Problem der Verdunstung und Verdampfung endgültig gelöst und die Solutionstheorie[1]) für immer beseitigt. Wenn die Sättigungscapacität eines Raumes für den Dampf irgend einer Flüssigkeit unabhängig ist von dem Vorhandensein und der Natur eines anderen in dem Raume befindlichen Gases, so kann dieses Gas nicht die Ursache der Verdunstung der Flüssigkeit sein, und es ist also absolut nicht möglich, dass eine Flüssigkeit nur dadurch verdunstet, dass sie in der atmosphärischen Luft, mit der sie in Berührung ist, sich auflöst. Die abstossende Kraft der Wärme ist vielmehr überall bestrebt, die Theilchen der Flüssigkeit von einander zu entfernen und dieselben in Dampf aufzulösen. Im Inneren der Flüssigkeiten ist dies nicht allezeit möglich, weil der Luftdruck, welcher auf den oberen Flüssigkeitsschichten lastet, die Dampfentwickelung wenigstens so lange verhindert, bis die mit steigender Temperatur grösser werdende Spannkraft der Dämpfe den Luftdruck zu überwinden vermag, wonach erst das Sieden eintritt. An der Oberfläche der Flüssigkeiten hingegen, wo dieselben nur durch die Atmosphäre eingeschlossen sind, vermag bei allen Temperaturen die Wärme auflösend zu wirken, weil ein mit Gas erfüllter Raum der Verbreitung von Dämpfen gegenüber sich wie ein leerer Raum verhält. Von der Oberfläche der Flüssigkeiten also breiten die Dämpfe sich immerwährend gleichmässig in dem Raume aus, steigen also auch der Schwere entgegen fortwährend in die Höhe, und der Druck der Atmosphäre kann niemals weder die Verdunstung, noch auch die vollständige Ausbreitung der Dämpfe im Raume hindern, sondern nur mehr oder weniger verlangsamen. Die alte Streitfrage lautete also nicht mehr, wie wird das Wasser in die Wolken gehoben, sondern wie ist es möglich, dass sich das aus dem Wassergas schon wieder condensirte flüssige Wasser in den Wolken hält? Zur Erklärung dieses Problems behielt man meist noch die alte Bläschentheorie[2]) bei. Nur einige Physiker verneinten

---

[1]) Siehe den zweiten Band dieses Werkes, S. 349. Saussure schreibt 1784 in seinem Versuche über die Hygrometrie (S. 224): „Die völlige Durchsichtigkeit einer von Dünsten gesättigten Luft . . . das Verschwinden der Dünste durch die Wärme, ihr plötzliches Erscheinen durch die Kälte, ihre innige Vereinigung mit der Luft, ungeachtet ihrer verschiedenen Dichtigkeit, sind sichere Kennzeichen . . . einer wahrhaft chemischen Auflösung."

[2]) Ganz unverändert war auch diese Theorie nicht geblieben. Die Versuche, die Bläschen für specifisch leichter als atmosphärische Luft auszugeben, hatte

das Schweben der Wolken überhaupt und beschrieben dieselben als Haufen von Tröpfchen, welche stetig in der Atmosphäre niedersänken, aber wegen des bei der Kleinheit der Tröpfchen verhältnissmässig grossen Widerstandes der Luft mit so geringer Geschwindigkeit, dass das Fallen durch jeden Luftzug wieder in ein Steigen umgewandelt werde [1]). Für den Eindruck, den Dalton's Verdampfungstheorie auf die zeitgenössischen Physiker machte, sagt P. Erman (Gilbert's Ann. XL, 1812, S. 392) sehr charakteristisch: „Seitdem es factisch erwiesen war, dass im luftleeren Raume die Menge und Elasticität des Wasserdampfes genau dieselbe ist, wie unter dem Druck der Atmosphäre, kostete es vielen Naturforschern wenig Ueberwindung, dem Auflösungssystem zu entsagen. . . . So hatte also eine grosse Mehrheit, deren Charakter selten eine strenge Consequenz zu sein pflegt, die Auflösungshypothese verlassen, ohne das klare Bewusstsein mit hinüber zu nehmen von dem, was eine Theorie voraussetzt und in sich schliesst, die alles auf blosse Temperatur zurückbringt. Diese Folgerung sprach Dalton ruhig aus und setzte mit muthiger Consequenz seinen Weg fort durch alle abschreckenden Folgerungen einer echten Anti-Auflösungstheorie. Da stutzten beide Parteien fast in gleichem Grade.“ Physiker, wie Tralles, Berthollet, Murray, Thomson u. v. A., wollten sich auch durchaus nicht mit Dalton's Ansicht von der Zusammensetzung unserer Atmosphäre befreunden. Dalton hatte sich gegen eine Menge von Einwürfen, die vielfach in der herrschenden Theorie der Wärme ihren guten Grund hatten, schwer zu vertheidigen; und obgleich er das mit grossem Geschick und manchmal vielleicht zu viel Eifer that, so hörte doch alles Misstrauen gegen seine Theorie erst spät mit der Annäherung an die neuere Wärmetheorie auf.

Ueberhaupt haben Dalton's wissenschaftliche Arbeiten merkwürdige Schicksale gehabt; sie sind ebenso enthusiastisch gepriesen, wie heftig getadelt worden. Wir haben schon einmal erwähnt, wie abfällig der sonst so objective Muncke über Dalton's Apparate urtheilt und können von ihm noch den anderen harten Ausspruch anmerken [2]): „Nicht leicht sind die Versuche allgemeiner beachtet und mehr über jeden Werth geschätzt, als diejenigen, welche John Dalton angestellt hat, um ein allgemeines Gesetz über die Elasticitäten der Dämpfe

---

man fallen lassen. Gay-Lussac (Ann. de chim. et de phys., XXI, 1822) gebraucht auch für die Dampfbläschen noch einen aufsteigenden Luftstrom, der ihr Fallen verhindert.

[1]) Die bekannte Eintheilung der Wolken in Cirrus (Federwolke), Cumulus (Haufenwolke) und Stratus (Schichtwolke) gab Luke Howard (An essay of the modifications of clouds, London 1802. Versuch einer Naturgeschichte und Physik der Wolken, Gilbert's Ann. LI, 1815, S. 1 bis 48). Göthe (Naturw. Correspondenz, Leipzig 1874, I, S. 64), der sich lebhaft auch für Meteorologie interessirte, versuchte noch eine Wolkenform, Paries (Wolkenkamm), einzufügen, meines Wissens ohne Erfolg.

[2]) Gehler's phys. Wörterb., 2. Aufl., II, S. 327.

Thermische Ausdehnung, Wärmeleitung, c. 1800 bis c. 1815.

aufzufinden." Fechner[1]) berichtet: „Die von Dalton aufgestellte Hypothese, dass die verschiedenen Gasarten, aus welchen die atmosphärische Luft besteht, gar nicht gegenseitig auf einander drücken, hat bisher bei wenig Physikern Beifall gefunden, unter welchen sich Benzenberg durch seinen unermüdlichen Eifer, mit welchem er jene Hypothese seit 20 Jahren in Schutz nimmt, auszeichnet". Dove[2]) urtheilt: „Die Behauptung Dalton's von dem Zusammenhang der Dampfspannungen aller Flüssigkeiten hat sich leider nicht bestätigt, doch giebt dieser Satz in allen Fällen eine so grosse Annäherung der beobachteten an die berechneten Werthe, dass man sich seiner in Ermangelung von besseren bedienen kann". Biot aber legte den betreffenden Abschnitten seines Lehrbuchs der Experimentalphysik (I, S. 251 bis 281) überall die Dalton'schen Versuche unter freudiger Anerkennung derselben zu Grunde. Die Ursachen für so verschiedene Beurtheilungen liegen zum Theil in der Art der Dalton'schen Arbeiten selbst. „Wie Dalton frühe darauf angewiesen war, im Leben sich selbst seinen Weg zu machen, schlug er auch in der Wissenschaft bald selbstständig eigene Bahnen ein. Er war Autodidact, und umfassende Kenntniss des von Anderen bereits Geleisteten kam ihm weniger zu, als festes Vertrauen auf das von ihm selbst gefundene. . . . Sein Scharfsinn liess ihn bei der Anstellung seiner Versuche, für welche er während der fruchtbringendsten Zeit seines Lebens nur über beschränkte Hülfsmittel verfügte, oft mehr die Vereinfachung der Apparate und des Verfahrens, als die Erzielung möglichst scharfer Resultate ins Auge fassen, und die Genauigkeit seiner quantitativen Bestimmungen steht der, zu welcher Zeitgenossen vor ihm bereits kamen, im Allgemeinen beträchtlich nach. Aber er war auch nicht allzu ängstlich in der Beurtheilung, innerhalb welcher Grenzen empirische Ermittelungen mit den Folgerungen aus theoretischen Ansichten — wenn diese von ihm selbst aufgestellte waren — übereinstimmen müssen, um die letzteren als wirklich bestehende nachzuweisen." Immerhin erklären diese Worte Kopp's[3]), welche in Bezug auf Dalton's chemische Arbeiten ausgesprochen auch für seine physikalischen gelten, nicht ganz die harten Urtheile, die über Dalton gefällt worden sind. Einige Schuld liegt wohl auch in jenen Physikern selbst. Die Physiker hatten sich nach und nach gewöhnt, das Experiment als Selbstzweck zu betrachten und damit die Genauigkeit desselben als höchstes Kriterium für den Werth einer wissenschaftlichen Arbeit zu nehmen. Damit verband sich dann eine gewisse Furchtsamkeit, die niemals die Wissenschaft der Gefahr aussetzen mochte, einen Schritt rückwärts zu thun, und die darum auch jeden schnelleren Schritt vorwärts, jede kühnere Hypothese aus der Wissenschaft gänzlich verbannt wissen wollte. Von diesem

---

1) Fechner's Repertorium der Physik, 1832, I, S. 108.

2) Dove's Repertorium der Physik, 1837, I, S. 58.

3) Entwickelung der Chemie in der neueren Zeit, München 1874, S. 287 bis 288.

Standpunkte aus musste Dalton allerdings seiner vielfach ungenauen experimentellen Resultate sowohl, als auch seiner öfters vorschnellen Construction von Naturgesetzen wegen verurtheilt werden. Später hat sich dem entgegen gezeigt, dass Dalton's leitende Ideen trotz alledem licht- und fruchtbringend, dass sie wohl geeignet waren, mit genaueren Experimenten verbunden, die Wissenschaft auf richtigem Wege weiter zu führen, und heutzutage erwähnt nur noch der Geschichtsschreiber der Wissenschaft der Schatten, die vielleicht natürlicher und nothwendiger Weise auch in den Leistungen Dalton's sich finden.

Thermische Ausdehnung, Wärmeleitung, c. 1800 bis c. 1815.

Um die Ausdehnung tropfbarer Flüssigkeiten zu bestimmen, wandten Deluc und in etwas anderer Weise Gay-Lussac[1]) offene Thermometer, G. G. Schmidt[2]) Gewichtsaräometer, Dulong und Petit[3]) communicirende Röhren, deren einen Schenkel sie auf der Normaltemperatur hielten und deren anderen Schenkel sie beliebig erwärmten, an. Alle diese Versuche sprachen dafür, dass Dalton's Vermuthung, nach welcher die Ausdehnung aller homogenen Flüssigkeiten dem Quadrate der Temperatur proportional sein sollte, nicht zutrifft, dass wohl die Ausdehnung mit der Temperatur wächst, dass aber dieses Wachsthum ein anderes und wahrscheinlich für alle Flüssigkeiten verschiedenes Gesetz befolgt. Besondere Schwierigkeiten bildeten für solche Messungen die Anomalien, welche sich in den Ausdehnungen der Flüssigkeiten zeigten. Am Wasser hatte man schon länger von einer gewissen Temperatur an mit dem Sinken derselben eine Ausdehnung statt einer Contraction beobachtet, war aber bis zu diesem Zeitpunkte geneigt gewesen, die beobachtete Anomalie für eine scheinbare zu erklären, deren Ursache nicht im Wasser, sondern vielmehr in der Zusammenziehung der das Wasser einschliessenden Gefässe liege. Deluc[4]) ist vielleicht der erste gewesen, welcher die Ursache dieser Erscheinung in das Wasser selbst setzte und den Punkt der grössten Dichtigkeit bestimmte. Er fand denselben, weil er die Zusammenziehung des Glases nicht berücksichtigte, etwas zu hoch, bei 5° C., und gab an, dass für gleiche Temperaturdifferenzen unter und über diesem Punkte die Volumina gleich seien. Dalton[5]), der ebenfalls die Ausdehnung des Glases ausser Betracht liess, gab für die Temperatur der grössten Dichtigkeit noch mehr als Deluc, nämlich 5,83° C. Rumford[6]) versuchte das Problem dadurch zu lösen, dass er Wasser

---

[1]) Ann. de chim. et de phys. II, p. 130, 1816.

[2]) Gren's neues Journ. I, S. 126.

[3]) Ann. de chim. et de phys. (2. ser.) VII, 1818.

[4]) Untersuchungen über die Atmosphäre, 1776, I, S. 439. Gilbert's Annalen, I, S. 471.

[5]) Mem. Manch., V, pt. II, p. 373; Gilbert's Annalen XIV, S. 184.

[6]) Ueber ein merkwürdiges Gesetz bei der Verdichtung des Wassers durch Kälte, Gilbert's Annalen I, S. 436 (aus Experiment. essays,

Thermische Ausdehnung, Wärmeleitung, c. 1800 bis c. 1815.

in einem offenen Gefässe an der Oberfläche abkühlte und beobachtete, bei welcher Temperatur das Wasser aufhörte niederzusinken. Obgleich das Verfahren noch heute im Princip als vortheilhaft gilt, fand er doch nur für das Maximum der Dichtigkeit die Grenzen der Temperatur zwischen 4⁰ und 5⁰ C.

Genauere Messungen der Ausdehnung fester Körper wurden durch die merkwürdigen Beobachtungen Richers' in Cayenne und den Streit über die Erklärung derselben [1]) angeregt. Doch war die Unvollkommenheit der Thermometer Ursache genug, dass solche Messungen, wie sie von Dalencé, Picard, La Hire, Derham u. A. ausgeführt wurden, wenig genaue Resultate gaben. Auch Musschenbroeck's bekanntes Pyrometer [2]) gab kaum brauchbare Resultate, weil seine Versuchsstange nicht gehörig befestigt war und die Wärme nicht bloss auf die Stange, sondern auch auf das Zeigerwerk wirkte. Smeaton (Phil. Trans. XLVIII, 1754) erhielt allerdings schon etwas genauere Zahlen; wirklich werthvoll und für die Praxis brauchbar aber waren erst die Messungen von Lavoisier und Laplace, die bei ihren Versuchen als feste, von den Wirkungen der Wärme unberührte Punkte Pfeiler von Stein und zum Messen der Ausdehnung ein Fernrohr, welches von der sich ausdehnenden Metallstange gedreht wurde, anwendeten. Ihre Versuche wurden übrigens in den Stürmen der Revolution übersehen und erst durch Biot [3]) allgemein bekannt.

Die Bestimmung der Ausdehnung der Körper hängt vielfach theoretisch und praktisch von der Leitungsfähigkeit derselben für die Wärme ab; es ist nur natürlich, dass mit den vorhergehenden Arbeiten auch Versuche über die letztere Hand in Hand gingen. Richmann [4]) liess sich (in den Jahren 1750 bis 1751) Kugeln aus verschiedenen Metallen, aber von gleicher Grösse, verfertigen und beobachtete bei allen die Zeiten gleicher Abkühlungen. Er fand so für die Metalle die Reihenfolge Blei, Zinn, Eisen, Kupfer, Messing und schloss daraus, dass Blei am schnellsten die Wärme aufnehme und abgäbe u. s. w. Jedenfalls zeigte die Reihe, dass keineswegs, wie man früher angenommen, die Leitungsfähigkeit der Körper für die Wärme der Dichte derselben proportional sei. Franklin und etwas

---

pol., oecon. and phil.; essay VII, London 1797). Ueber einige Experimente etc., Gilb. Ann. XX, S. 369 (aus Nicholson's Journal XI, 1804). Berzelius schreibt (Jahresbericht über die Fortschritte d. Phys. und Chem. IV, S. 73, 1824) die Entdeckung der anomalen Ausdehnung des Wassers geradezu Rumford zu; der letztere aber erkennt (Gilbert's Annalen XX, S. 370) selbst an, dass Deluc viele Jahre vorher diese Thatsache zuerst bekannt gemacht hat.

[1]) Siehe Bd. II d. W., S. 185.

[2]) Siehe Bd. II d. W., S. 325.

[3]) Lehrb. d. Experimentalphysik I, S. 228.

[4]) Der Petersburger Akademiker, s. Bd. II d. W., S. 318.

später Achard[1]) waren geneigt, die Leitungsfähigkeit der Körper für Wärme ihrer Leitungsfähigkeit für Elektricität gleichzusetzen. Um darüber zu entscheiden, überzog Ingenhouss[2]), einem Vorschlage Franklin's folgend, Drähte aus verschiedenen Metallen mit einer dünnen Wachslage, senkte die Enden derselben in einen mit heissem Oel gefüllten Trog und beobachtete, wie weit in einer gewissen Zeit die zum Schmelzen des Wachses nöthige Hitze in jedem Stabe fortschritt. Danach sollte die Reihenfolge der Metalle (der besseren Leitungsfähigkeit nach) fast die umgekehrte wie bei Richmann, nämlich Silber, Kupfer, Gold, Eisen, Stahl, Blei werden. Ingenhouss schrieb nämlich demjenigen Metall die grösste Leitungsfähigkeit zu, von dem das Wachs bei jenen Versuchen am weitesten abgeschmolzen, in dem also die Wärme am weitesten vorgedrungen war. J. T. Mayer[3]) freilich wollte die grösste Leitungsfähigkeit in dem Metalle finden, das die Wärme am schnellsten nach aussen abgab, an dem das Wachs also am wenigsten abschmolz, wonach die Versuche von Richmann und Ingenhouss zu übereinstimmenden Folgerungen führen müssten[4]). Fourier zeigte, wie wir später sehen werden, dass beide Gegner gleichviel Recht und Unrecht hatten.

Thermische Ausdehnung, Wärmeleitung, c. 1800 bis c. 1815.

In ganz anderer Weise endete der Streit über die Leitungsfähigkeit der Flüssigkeiten, der nach Versuchen des Grafen Rumford ausgebrochen war. Buffon wollte, wie viele andere vor ihm, wahrgenommen haben, dass Flüssigkeiten die Wärme besser leiten als feste Körper; Rumford aber bewies gerade das Gegentheil. Schon in den Jahren 1786 und 1792 hatte der letztere in den Philosophical Transactions Aufsätze über die Wärmeleitung verschiedener Substanzen veröffentlicht, 1797 folgten dann die am meisten Aufsehen erregenden über die Flüssigkeiten[5]). Den Anlass zu diesen Versuchen gab die Beobachtung, dass gewisse dickflüssige Speisen sich nur sehr langsam abkühlten, und dass in Wasser, welches in einer weiten Röhre von unten erhitzt wurde, immerwährend auf der einen Seite Ströme aufstiegen, die sich an

[1]) Franz Carl Achard, 1753 — 1821, Director der physik. Classe der Berliner Akademie.

[2]) Vermischte Schriften, physikalisch-medicinischen Inhalts, übersetzt von Molitor, Wien 1784, Thl. II. Gren's Journ. I, S. 154. Vergleiche Fischer, Geschichte der Physik, VII, S. 332 ff.

[3]) Johann Tobias Mayer (1752—1830, Prof. d. Mathematik und Physik in Altdorf, Erlangen, Göttingen, Sohn des grossen Astronomen): Ueber die Gesetze und Modificationen des Wärmestoffs, Erlangen 1786; Ueber das wärmeleitende Vermögen der Körper, Gren's Journ. III, S. 19, 1791; Ueber das Gesetz, welches die Leitungskräfte etc., Gren IV, S. 23, 1791.

[4]) Riggenbach: Entwickelung der Grundbegriffe der Wärmefortpflanzung. Basel 1884, S. 36.

[5]) Experimental essays, pol. oeconom. and phil. Essay VII, London 1797. Auszug in Gren's neuem Journal IV, S. 48: Versuche und Beobachtungen über die Fortpflanzung der Wärme in Flüssigkeiten; Fortsetzung in Gilbert's Ann. I, S. 214 bis 241, 323 bis 351.

Thermische Ausdehnung, Wärmeleitung, c. 1800 bis c. 1815.

der anderen Seite wieder abwärts senkten. Indem Rumford diese beiden Erscheinungen combinirte, wurde es ihm wahrscheinlich, dass die Flüssigkeitstheilchen wohl von anderen Körpern Wärme aufnehmen oder an solche abgeben, aber keine Wärme von einem ihrer Theilchen zum anderen überleiten, dass also Flüssigkeiten niemals durch innere Leitung, sondern nur durch innere Strömungen erwärmt werden könnten, und dass mithin alle Flüssigkeiten absolute Nichtleiter der Wärme seien. Um dies genauer nachzuweisen, brachte er in ein cylindrisches Glas eine Eisscheibe, die er mit einer Spitze versehen, und goss darüber Olivenöl. Dann konnte er einen in siedendem Wasser erhitzten eisernen Cylinder bis in eine Entfernung von 0,2 Zoll über die Eisspitze bringen, ohne dass dieselbe schmolz oder sich veränderte, wenn er nur den Cylinder so vorsichtig in das Oel einsenkte, dass Strömungen in demselben vermieden wurden.

Trotz dieses schlagenden Versuches riefen die Behauptungen Rumford's doch einen starken Sturm unter den damaligen Physikern hervor. Deluc[1]) wandte sich von seiner Theorie der Wärme aus mit theoretischen Gründen gegen Rumford; Nicholson[2]) wollte durch Versuche Rumford widerlegen; Socquet[3]) zeigte, dass wenigstens durch Quecksilber hindurch das Eis von einem darüber stehenden heissen Cylinder geschmolzen wurde, und Murray[4]) beobachtete, als er ein Thermometer in das Oel setzte, doch eine geringe Temperaturerhöhung. Dalton[5]) aber war schon 1799 zu der Ansicht gelangt, dass dem Wasser zwar ein Leitungsvermögen für die Wärme nicht ganz abzusprechen, dass aber die Grösse desselben im Vergleich zu dem der festen Körper doch eine sehr geringe sei. Diesem Compromiss schlossen sich bald die meisten Physiker an, und Fischer spricht in seiner Geschichte der Physik (VII, S. 362, 1806) dieses Endergebniss in den klaren Worten aus: „Der Herr Graf von Rumford scheint also doch wenigstens so viel erwiesen zu haben, dass die elastischen und unelastisch flüssigen Materien schlechte Leiter der Wärme, nicht aber vollkommene Nichtleiter der Wärme sind“ [6]).

Volta'sche Batterie, c. 1800 bis c. 1820.

Der Streit zwischen Galvani's und Volta's elektrischer Theorie war am Ende des 18. Jahrhunderts auf einen Punkt gekommen, wo eine Entscheidung in kurzer Zeit kaum möglich erschien. Galvani hatte ohne

---

[1]) Gilbert's Ann. I, S. 464, 1798.

[2]) Nicholson's Journ. V, S. 197.

[3]) Gilb. Ann. VI, S. 407.

[4]) Gilbert's Ann. XIV, S. 158, 1803.

[5]) Manch. Mem. V, pt. II, p. 373, 1802: On the power of fluids to conduct heat, with reference to Count Rumford's seventh essay on the same subject. Gilbert's Ann. XIV, S. 184.

[6]) Beobachtungen, aus denen man auf die geringe Wärmeleitung der Flüssigkeiten hätte schliessen können, waren übrigens schon länger bekannt. Desmarest (Rozier's Journ. XXII, 1781) constatirte z. B., dass Eisennägel am Boden eines grossen, mit Wasser gefüllten Gefässes selbst bei strenger Kälte nur Eis ansetzten, wenn er das Wasser umrührte.

Volta'sche Batterie, c. 1800 bis c. 1820.

Anwendung eines Metalls an den Froschschenkeln elektrische Zuckungen, und Volta hatte ohne jede organische Substanz mit Hülfe seines Condensators bei der Berührung von Metallen unleugbar elektrische Erscheinungen nachgewiesen. Galvani war gestorben, ohne seine Versuche zur allgemeinen Anerkennung bringen zu können. Volta aber gelang es nach kurzer Zeit, die **Metallelektricität** so zu verstärken, dass die Galvani'sche Idee einer thierischen Elektricität gänzlich in den Hintergrund gedrängt und für lange Zeit durchaus verlassen wurde.

Nach seiner eigenen Versicherung baute Volta die nach ihm benannte Säule am Ende des Jahres 1799 zum ersten Male auf; die erste Nachricht davon gab er in einem Briefe aus Como an den Präsidenten der Royal Society, Sir Joseph Banks, am 20. März 1800 [1]). Die Säule sollte aus einer Anzahl Platten von Silber oder Kupfer, einer gleichen Anzahl von Zinkplatten und einer gleichen Anzahl von Scheiben aus Kartenblättern, Leder, Zeug oder Pappe, die mit Wasser, oder besser mit einer alkalischen Lauge getränkt waren, bestehen. Diese Platten mussten so auf einander geschichtet werden, dass immer abwechselnd Silber, Zink und feuchte Pappe auf einander folgten. Ausser dieser Säule beschrieb Volta noch in dem ersten Briefe auch seinen Becherapparat. Eine Reihe von Gläsern wird mit warmem Wasser oder einer Salzlösung gefüllt und in jedes Glas eine Zink- und eine Silberplatte gestellt, doch so, dass dieselben sich nicht berühren. Jede Platte muss dabei mit einem verlängerten Haken versehen sein, durch welchen man immer das Zink des einen Glases mit dem Silber des folgenden Glases verbinden kann. Die Schliessung der Kette zwischen dem Silber des ersten und dem Zink des letzten Glases bringt dann die elektrischen Erscheinungen ebenso wie die Säule hervor [2]).

Die starken elektrischen Wirkungen, welche diese beiden Apparate gaben, erklärte Volta in zwei Vorlesungen, welche er vor dem französischen Nationalinstitute in Paris am 7. und 21. November 1800 hielt,

[1]) Gilbert's Ann. VI, 1800, S. 340 (nach Nicholson's Bericht in seinem Journal IV, p. 179). Ausführlich in Phil. Trans. 1800.

[2]) So sehr auch Volta's Säule die Physiker überraschte, so war sie doch nicht ganz ohne Vorläufer. Der Abhandlung Rich. Fowler's „Experiments a. observ. relative to the influence lately discovered by Mr. Galvany and commonly called Animal Electricity (London 1793)" war ein Brief (datirt vom 28. Mai 1792) von Robison angehängt, in welchem es heisst: „Ich verschaffte mir mehrere Stücke Zink von der Grösse eines Schillings und legte sie mit ebensoviel Schillingen abwechselnd auf einander in Form einer kleinen Geldrolle. Eine solche Vorrichtung, finde ich, vermehrt in einigen Fällen den Reiz beträchtlich, und ich erwarte von einem ähnlichen Verfahren eine noch grössere Verstärkung desselben. Bringt man die eine Seite von einem Röllchen an die Zunge, so dass diese alle einzelnen Stücke davon berührt, so ist der Reiz sehr stark und unangenehm." (Gehler's physikalisches Wörterbuch, zweite Auflage, IV, S. 568 bis 569; Gilbert's Annalen X, S. 481.)

Volta'sche Batterie, c. 1800 bis c. 1820.

auf folgende Weise [1]). Durch die Berührung zweier Metalle von verschiedenem Leitungsvermögen, wie von Silber und Zink, wird das Gleichgewicht der in den beiden Metallen enthaltenen Elektricitäten gestört. An der Berührungsstelle strömt die positive Elektricität so aus dem Silber nach dem Zink, dass sie sich auf diesem verdichtet, während die negative auf dem Silber sich ansammelt. Schichtet man nun Elemente von Silber und Zink ohne Zwischenglieder auf einander, so stehen die mittleren Zinkplatten immer oben und unten mit je einer Silberplatte in Berührung, deren Wirkungen sich zu Null aufheben. Es kommen dann einzig und allein die untere Silber- und die obere Zinkplatte zu freier Wirkung; alle Mittelplatten verhalten sich nur als Leiter der Elektricität, und die ganze Säule wirkt nur wie ein einziges Plattenpaar. Man darf also, wenn die Wirkungen der einzelnen Plattenpaare sich summiren sollen, jede Zinkplatte nur mit einer Silberplatte in directe Berührung setzen, was dadurch eben erreicht wird, dass man auf jede Zinkplatte eine feuchte Scheibe legt und sie dadurch von der Silberplatte trennt, ohne der Elektricität den Weg abzuschneiden. Scheiben aus einem dritten Metall kann man statt der feuchten Leiter dabei nicht gebrauchen; auch diese würden in der Säule entgegengesetzte Strömungen hervorrufen und so die Wirkung derselben wenigstens theilweise neutralisiren. Die Flüssigkeiten aber geben wegen ihrer geringeren Leitungsfähigkeit mit Metallen nur sehr geringe elektrische Spannungen, und eine Combination von Leitern erster und zweiter Ordnung ist unbedingt nöthig, wenn der Aufbau einer Säule die Wirkung des einzelnen Elementes vervielfachen soll.

Neue Eigenschaften der galvanischen Elektricität entdeckte übrigens Volta mit seinen neuen Apparaten vorerst nicht; er zeigte nur die bekannten in ausserordentlich verstärktem Maasse. Statt der Muskelzuckungen gab die Säule, wenn man ihre Pole mit feuchten Händen anfasste, starke empfindliche Schläge; die Lichterscheinungen am Auge und die Geschmackserscheinungen auf der Zunge wurden viel bemerklicher; wenn man die Poldrähte in die Ohrhöhlen legte, so ging ein Krachen durch den Kopf, so stark, dass Volta den Versuch nicht zu wiederholen wagte etc. Nur eine Wirkung der gewöhnlichen Elektricität, den elektrischen Geruch, vermochte Volta nicht mit seiner Säule hervorzubringen, wahrscheinlich darum, weil diese Elektricität nicht im Stande war, sich frei in der Luft zu verbreiten. Das Nationalinstitut von Frankreich nahm grosses Interesse an Volta's Versuchen, eine Commission desselben, deren Berichterstatter Biot war, meldete schon in der Sitzung vom 1. December 1801, dass ihre Experimente die Behauptungen Volta's durchaus bestätigt hätten. Das Institut stiftete danach auf den Vorschlag Bonaparte's, der Volta's Vorträgen angewohnt hatte, zwei Preise (einen grösseren für eine Hauptentdeckung

[1]) Vergl. Gilb. Ann. IX, S. 489 (erste Nachricht); X, S. 389 (Biot's Commissionsbericht); X, S. 421 und XII, S. 497 (Volta's Abhandlungen).

und einen kleineren, jährlich zu vertheilenden) für die besten Arbeiten auf dem neuen physikalischen Gebiete, und erkannte Volta sogleich die goldene Medaille des Instituts zu [1]). Trotz dieser Stiftung haben die Franzosen im Anfange nicht allzuviel Epochemachendes für die neue Entdeckung geleistet, vielmehr waren es die Engländer vor Allem und dann auch die Deutschen, welche die Lehre von der galvanischen Elektricität bis zur Entwickelung des Elektromagnetismus fast allein ausbildeten.

Volta'sche Batterie, c. 1800 bis c. 1820.

Sir Joseph Banks hatte Volta's Brief bald nach dem Empfange an Sir Anthony Carlisle [2]) mitgetheilt. Dieser baute am 30. April 1800 mit Nicholson [3]) gemeinschaftlich aus 17 Plattenpaaren eine Säule auf und erhielt mit dieser nicht bloss die nach Volta's Briefe erwarteten Wirkungen, sondern gelangte auch, noch ehe nur der letztere in der Royal Society verlesen war [4]), zu einer Entdeckung, die sich theoretisch und praktisch als gleich wichtig erweisen sollte. Als nämlich Carlisle auf die obere Zinkplatte, um die Berührung zwischen derselben und dem Leitungsdraht sicherer zu machen, einen Tropfen Wasser brachte, bemerkte er, dass aus diesem Tropfen, wenn der Zuleitungsdraht eingetaucht wurde, sich ein Gas entwickelte, welches Nicholson „nach Wasserstoff zu riechen schien". Er nahm danach eine Glasröhre von $1/2$ Zoll Weite, füllte sie mit frischem Brunnenwasser, verschloss sie mit Korken, durch welche er zwei Messingdrähte so führte, dass ihre Enden noch $1\,3/4$ Zoll von einander abstanden, und verband dann diese beiden Drähte mit den Enden der Säule. Sogleich erhob sich aus der Spitze des mit dem Silber verbundenen Drahtes ein feiner Strom kleiner Luftbläschen, während der andere Draht anlief und zuletzt schwarz wurde. Verband man die Drähte entgegengesetzt mit der Säule, so kehrten sich die Erscheinungen um. Das erhaltene Gas explodirte, wenn es mit der gleichen Menge Luft gemischt und dann entzündet wurde. Wurden statt der Messingdrähte Platinadrähte benutzt, so entwickelte sich an beiden Gas, aber an dem von Zink kommenden viel weniger als an dem anderen. Daraus schlossen die beiden Experimentatoren, dass das Gas am Zink-

---

[1]) Gilbert's Ann. X, S. 408; Gehler's Wörterb. IV, S. 571. Volta's Säule und Becherapparat waren seine Abschiedsgaben an die Physik; von 1802 an hat er ausser einigen kleineren Abhandlungen über Hagel und Gewitter bis zu seinem Tode im Jahre 1827 nichts mehr veröffentlicht. Einige Biographen erklären das durch geistige Erschöpfung, andere durch die Furcht Volta's, nur noch Minderwerthiges bieten zu können. Die erwähnten Abhandlungen schliessen wohl die letztere Erklärung aus.

[2]) Anthony Carlisle, 1768 — 1840, lebte als Arzt in London.

[3]) William Nicholson, 1753 — 1815, nacheinander Beamter der ostindischen Compagnie, Geschäftsreisender, Schulvorsteher, zuletzt Civilingenieur und Schriftsteller in London. Gab von 1786 bis 1813 das Journal of natural philosophy, chemistry and the arts heraus. Die Nachricht von der Zersetzung des Wassers gab Nicholson in der schon citirten Abhandlung im Julihefte des IV. Bandes von seinem Journal (Gilb. Ann. VI, S. 346).

[4]) Das geschah erst am 26. Juni 1800 (Hoppe, Gesch. d. Elektricität, S. 133).

Volta'sche Batterie, c. 1800 bis c. 1820.

ende Sauerstoff sei. Obgleich man nun schon vorher gewusst, dass der Funke einer elektrischen Batterie das Wasser zersetzt, so machte doch die Thatsache, dass der verhältnissmässig schwache galvanische Strom dieselbe Wirkung stetiger ausüben könne, sehr bedeutendes Aufsehen. Ritter berichtete im September 1800 [1]), dass er beide Gase bei der Wasserzersetzung gesondert aufgefangen, dass alle Flüssigkeiten unter gehörigen Umständen Luft abgäben und endlich, dass aus Kupfervitriol durch den Strom das Kupfer niedergeschlagen werde. Cruikshank zeigte ebenfalls noch im Jahre 1800, dass viele Salzlösungen durch den Strom zersetzt werden, und dass dabei die Säuren sich am positiven, die Metalle am negativen Pole niederschlagen [2]). Auch Davy begann in dieser Zeit mit seinen Arbeiten, die in ihrem Fortgange eine so grosse Berühmtheit erlangen sollten. Seine erste Abhandlung über diesen Gegenstand sandte er im September 1800 von Bristol nach London. Die erste Serie derselben, die bis 1802 in Nicholson's Journal veröffentlicht wurde, behandelte nur die Zersetzung des Wassers. War es schon vorher aufgefallen, dass sich die beiden Zersetzungsproducte des Wassers an getrennten Orten ansammelten, so zeigte nun Davy, dass diese Producte sogar in vollkommen von einander getrennten Gläsern aufgefangen werden könnten. Er nahm zwei $1/3$ Zoll weite und 4 Zoll lange Glasröhren, die an einem Ende offen waren, und durch deren anderes zugeschmolzenes Ende ein Stück Golddraht ging. Diese Röhren füllte er mit destillirtem Wasser und hängte sie umgekehrt mit dem offenen Ende jede in ein besonderes Glas, das ebenfalls mit destillirtem Wasser gefüllt war. Die Golddrähte der Röhren wurden dann mit den Enden der Volta'schen Säule und das Wasser in den beiden Gläsern durch eine frische Muskelfaser in leitende Verbindung gesetzt. Dann erhob sich sogleich in beiden Röhren an den Drähten Gas, und zwar an dem Drahte am meisten, der vom Silber kam. Hier war nach $4^1/_2$ Stunden die Röhre bis ans Ende des Drahtes mit Gas gefüllt, worauf der Process aufhörte. Die genaue Bestimmung des Volumverhältnisses, nach welchem die Gase entwickelt werden, zeigte sich nicht so leicht, als zu erwarten gewesen, weil das benutzte Wasser entweder schon vor dem Versuche Luft aufgelöst enthielt, oder weil sich während des Versuches ein Theil der entwickelten Luft in Wasser löste. Doch gelang es Davy zuletzt, bei Beobachtung mancher Vorsichtsmaassregeln zu beweisen, dass der elektrische Strom aus dem Wasser (nahezu wenigstens) doppelt so viel Wasserstoff als Sauerstoff entwickelt, so wie es nach der bekannten Zusammensetzung des Wassers der Fall sein muss [3]).

Die Verbindung der beiden Gläser durch eine Muskelfaser war wohl durch einen Rest der Galvani'schen Vorstellungen von der Wirk-

---

[1]) Gilbert's Ann. VI, S. 470.

[2]) Nicholson's Journ. IV, S. 187, 254; Gilb. Ann. VI, S. 360, VII, S. 88.

[3]) Nicholson's Journ. IV, S. 275, 326. Gilbert's Ann. VII, S. 114.

samkeit der Muskelfasern veranlasst, doch blieb Davy nicht dabei stehen. Er verband die Gläser auch durch seinen Körper oder durch feuchte Pflanzenfasern oder durch benetzte Fäden, immer ging die chemische Zersetzung in derselben Weise vor sich, nur der besseren oder schlechteren Leitungsfähigkeit der Stoffe entsprechend schneller oder langsamer. Davy hatte damit die Sonderung der bei der elektrischen Zersetzung auftretenden Stoffe aufs höchste getrieben; die dabei auftretende scheinbare Transportation der Zersetzungsproducte durch den galvanischen Strom, die man bald an allen möglichen Flüssigkeiten zeigte, bildete die Hauptschwierigkeit für alle Versuche zur Erklärung dieser auffallenden Erscheinungen.

Volta'sche Batterie, c. 1800 bis c. 1820.

Ehe wir indessen hierauf näher eingehen, verfolgen wir die experimentelle Entwickelung des Elektrochemismus noch etwas weiter. Gautherot[1]) hatte im Jahre 1802 bemerkt, dass zwei Golddrähte, die mit den Polen einer Batterie in Verbindung standen, nur einen schwachen Geschmack auf der Zunge gaben, dass aber, wenn er die Drähte von der Batterie trennte und, ohne die einen Enden von der Zunge zu lassen, die anderen Enden unter sich vereinigte, der Geschmack viel stärker wurde. Ritter[2]) untersuchte diese Erscheinung enthusiastisch und eifrig wie immer. Er nahm Golddrähte, die bei der Wasserzersetzung als Polenden gedient hatten, mit diesen Enden auf die Zunge und schloss die anderen Enden zusammen. Dann empfand er den galvanischen Geschmack, als seien die Drähte mit einer Säule verbunden, nur gab jetzt, umgekehrt wie früher, der Draht, welcher als positiver Pol gedient hatte, den laugenhaften, und der vorher negative Pol den sauren Geschmack. Nach vielen Versuchen mit solchen Poldrähten stellte er schliesslich aus 40 Kupferplatten und 40 feuchten Zwischenscheiben eine ganze Säule her und brachte deren Poldrähte mit den Drähten einer Volta'schen Batterie aus 100 Elementen in Verbindung. Wenn diese Verbindung nach längerer Zeit unterbrochen wurde, so verhielt sich nun die erste Säule selbstständig wie eine Volta'sche Batterie, aber ihre Polenden waren den Polen, mit welchen sie in Verbindung gestanden hatten, entgegengesetzt. Diese Ladungs- oder secundären Säulen erregten grosses Interesse und veranlassten viele weitere Arbeiten. Ritter erklärte sich ihre Wirkung, wie schon der Name Ladungssäule anzeigt, durch die Annahme, dass die Elektricität der

---

[1]) Nicolas Gautherot, 1753 — 1803, Musiklehrer in Paris.

[2]) Johann Wilhelm Ritter, geboren am 16. December 1776 in Samitz bei Hainau in Schlesien, zuerst Pharmaceut, von 1795 an als Student in Jena, von 1804 an als ordentliches Mitglied der Akademie in München. Er starb daselbst am 23. Januar 1810, erst 33 Jahre alt. Ritter ist ein schwer zu würdigender Charakter, genial, weit ausblickend, kühn combinirend und immer enthusiastisch vorwärts strebend; dabei aber ohne rechte Mässigung, vielfach ohne die nöthige Vorsicht und Kritik und darum mehrfach auf Abwegen, die schwer begreiflich sind.

Volta'sche Batterie, c. 1800 bis c. 1820.

primären Säule in der secundären aufgespeichert worden sei. Er nahm das um so sicherer an, als er bemerkt zu haben glaubte, dass die secundäre Säule um so stärker geladen werde, je schlechter die Flüssigkeit leitet, mit der man die feuchten Scheiben getränkt hat[1]). Die Erklärung war an sich wegen der Umwechslung der Elektricitäten, die dabei statt hat, nicht wahrscheinlich. Volta widersprach auch derselben direct und behauptete ganz richtig, durch die Zersetzung des Wassers lade sich die Kupferscheibe an der einen Seite mit Wasserstoff, an der anderen mit Sauerstoff, es bilde sich also eine Säule aus einem Metall und zwei Flüssigkeiten[2]). Damit war aber die Sache für die damaligen Physiker abgethan und blieb vor der Hand ohne weitere Folgen. Ritter hatte überhaupt seine eigenen Ansichten über die chemischen Kräfte der elektrischen Ströme und die Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser. Er neigte zu der alten Ansicht, dass das Wasser einfach sei und als Ganzes am positiven Pole in Wasserstoff und am negativen Pole in Sauerstoff verwandelt werde[3]). Dem gegenüber bemühte sich Davy, sicher zu zeigen, dass Ritter's Gedanke von einer Erzeugung neuer Stoffe aus dem Wasser unmöglich sei und dass alle besonderen Stoffe, wie Säuren, Metalle etc., die manchmal bei der Zersetzung des Wassers aufträten, nur aus Verunreinigungen des Wassers, welche aus den Poldrähten, dem Gefässe etc. herrührten, erhalten würden. Im weiteren Verfolge solcher Untersuchungen gelang dann Davy auch die Zersetzung der Alkalien, deren Zusammensetzung aus Metallen und Sauerstoff man seit Lavoisier wenigstens vermuthet hatte. Davy[4]) leitete den elektrischen Strom eines Trogapparates aus 100 Plattenpaaren (jedes 6 Zoll im Quadrat) durch Aetzkali, welches er in einem Platinlöffelchen bei heftiger Rothglühhitze geschmolzen erhielt. Als er den positiven Pol mit dem Platinlöffelchen in Verbindung brachte und den negativen Pol in das Kali tauchte, sah er, so lange die Verbindung dauerte, an dem negativen Drahte ein sehr lebhaftes Licht und im Berührungspunkte eine Flammensäule, welche von einem sich hier entbindenden verbrennlichen Körper

---

[1]) Die ersten hierher gehörigen Versuche Ritter's in Voigt's Mag. f. Naturk. VI, 1803.

[2]) Hoppe, Geschichte der Elektricität, S. 165.

[3]) Gilbert's Ann. IX, S. 265 bis 326.

[4]) On some new phaenomena of chemical chances produced by electricity, particularly the decomposition of fixed alkalies. Phil. Trans. for 1808 (gelesen November 1807). Gilb. Ann. XXXI, S. 113 bis 175, 1809. Die erste Nachricht von Davy's Entdeckungen kam noch im November 1807 durch Briefe nach Deutschland; welche Ueberraschung dieselben hervorriefen, ersieht man aus den Worten Hermbstädt's (1760—1833, Professor an der Universität Berlin) in Gilbert's Annalen XXVI, S. 120, 1807: „Dass die Alkalien und Erden, selbst in ihrem einfachsten Zustande, keine Elemente sind, davon bin ich völlig überzeugt; zweifle aber doch sehr, dass wir der Zerlegung derselben durch Herrn Davy bereits so nahe gerückt sind, wie es auf den ersten Anblick scheint."

Volta'sche Batterie, c. 1800 bis c. 1820.

herzurühren schien. Bei der umgekehrten Verbindung der Poldrähte bemerkte er am positiven Pole ein lebhaftes und bleibendes Licht, aber nichts, was einer Verbrennung geglichen hätte; dagegen sah er durch das Kali Gasbläschen aufsteigen, die sich an der Atmosphäre eines nach dem anderen entzündeten. Da das Kali vollkommen trocken war, schloss Davy, dass der am negativen Pole auftretende verbrennliche Körper durch eine Reduction des Kalis selbst hervorgebracht werde. Es gelang ihm danach auch, mit einem noch stärkeren Apparate, einer Batterie von 250 sechs- und vierzölligen Plattenpaaren, den verbrennlichen Körper, ein neues glänzendes Metall, das Kalium, in grösserer Menge herzustellen, vor der Oxydation zu schützen und unter Steinöl aufzubewahren. Aus dem Natron erhielt er durch seinen Apparat ein ähnliches Metall, und 1808 kam er auch zur Darstellung der Metalle der alkalischen Erden.

Davy's Erfolge zeigten deutlicher als alle bisherigen Arbeiten die Wichtigkeit der neuen physikalischen Potenz, der galvanischen Elektricität. Sie liessen den Physiker ein gutes Stück Chemiker werden, sie versprachen dem Chemiker leichte Entdeckungen nach klarer Methode. Sie zeigten dem Physiker die Möglichkeit, alle galvanischen Räthsel durch chemische zu lösen, boten umgekehrt dem Chemiker die Aussicht, den Grund aller chemischen Erscheinungen, die Affinität der Stoffe zu erklären und liessen endlich den Chemiker wie den Physiker einen ursächlichen Zusammenhang zweier und damit vielleicht aller Naturkräfte wenigstens ahnen. Kein Wunder, dass dieselben ebenso wie praktische Arbeiten auch theoretische Speculationen ins Leben riefen oder beförderten.

Wie schon erwähnt, erschien vor Allem bei der elektrochemischen Zersetzung die scheinbare Wanderung der Zersetzungsproducte, das gesonderte Freiwerden derselben an den beiden Polen, einer gar nicht leicht zu gebenden Erklärung bedürftig. Auf welche merkwürdige Weise Ritter sich die Sache zurecht gemacht, haben wir schon erzählt. Erdmann gab ähnlich wie Cruikshank, Foucroy, Vauquelin und Thénard an, dass nur am positiven Pole das Wasser zersetzt werde. Der Sauerstoff entwickelte sich hier allein, weil der frei werdende Wasserstoff vom elektrischen Strome gebunden und erst da, wo er in den negativen Pol einströme, frei gegeben werde. Dieser aus mehreren Gründen unwahrscheinlichen Erklärung stellte Grothuss[1]) schon 1805 eine andere entgegen, der sich Davy und die nachfolgenden Physiker angeschlossen haben und die bis auf einige Abänderungen heute noch in Gültigkeit ist. Danach ordnen sich zuerst unter dem Einflusse eines durch Wasser

[1]) Freiherr v. Grothuss (1785—1822, lebte von 1803 bis 1808 seiner wissenschaftlichen Ausbildung wegen in Leipzig, Paris, Rom, Neapel; danach auf seinem Gute Geddutz in Litthauen): Mém. sur la décomposition de l'eau, Rome 1805. (Auch Ann. de chim. et de phys. LVIII, 1806.)

Volta'sche Batterie, c. 1800 bis c. 1820.

gehenden elektrischen Stromes die Molecüle desselben so, dass alle Sauerstoffatome nach dem positiven und alle Wasserstoffatome nach dem negativen Pole hingekehrt sind. Der positive Pol reisst dann von dem ihm nächsten Wassermolecüle das Sauerstoffatom los und isolirt es. Das frei werdende Wasserstoffatom nimmt das nächste Sauerstoffatom an sich, das hierdurch frei gewordene Wasserstoffatom wieder das nächste Sauerstoffatom, und so schreitet die Zersetzung durch die Flüssigkeit weiter, bis endlich am negativen Pole das letzte Wasserstoffatom übrig bleibt. So wie aber dieses frei geworden, drehen sich unter dem fortdauernden Einflusse des elektrischen Stromes die nun entgegengesetzt gerichteten Molecüle wieder in die vorige Richtung um, und die Zersetzung beginnt von Neuem.

War somit die scheinbare Wanderung der Zersetzungsproducte erklärt, so blieb immer noch als Grundproblem die Aufhebung der chemischen Verwandtschaft durch die Elektricität überhaupt zurück. Dieses Problem aber schien damals, wo man alle physikalischen Kräfte als elementare Eigenschaften besonderer Materien betrachtete, nur durch die Annahme zu lösen, dass elektrische und chemische Kräfte identisch oder doch nur zwei verschiedene Erscheinungsweisen einer und derselben Grundkraft seien. In der That hielt man es für einen besonderen Vortheil, die gänzlich unempfindbaren chemischen Verwandtschaften aus den in ihren Wirkungen direct sichtbaren elektrischen Kräften erklären zu können. Davy sprach das noch vor seiner Darstellung der Alkalimetalle in einer Abhandlung, die er im November 1806 vor der Royal Society las, aus, indem er erklärte, dass elektrische wie chemische Attractionen von derselben Ursache hervorgebracht würden, die nur bei den ersteren zwischen den Massen selbst, im zweiten Falle aber zwischen den Atomen derselben wirke. Berzelius gründete auf solche Ideen seine neue Theorie der Chemie, sein elektro-chemisches System, das allgemein anerkannt und fast unbestritten bis zum Jahre 1840 gegolten hat. Nach diesem Systeme sind die Atome aller Elemente ursprünglich elektrisch polar, nur sind die an entgegengesetzten Seiten liegenden, entgegengesetzten Pole nicht gleich mächtig; vielmehr lassen sich alle Elemente je nach dem grösseren oder geringeren Vorwalten der einen oder der anderen Elektricität in eine Reihe ordnen, deren Glieder um so mehr chemische Verwandtschaft zu einander zeigen, je weiter sie in dieser Reihe von einander abstehen. Auch die Molecüle zusammengesetzter Körper besitzen noch solche Polarität, und so ist es möglich, dass solche Molecüle sich abermals mit anderen zu neuen, im höheren Grade zusammengesetzten Körpern verbinden können. Davy hat sich später[1]) darüber beklagt,

---

[1]) On the relations of electrical and chemical changes, Phil. Trans. 1826.

Volta'sche Batterie, c. 1800 bis c. 1820.

dass Einzelne ihm nicht den genügenden Antheil an dem Ursprunge der elektrochemischen Theorie zusprechen wollten, indem sie die Ehre mehrerer wichtigen Punkte, die von ihm früher als von irgend einem Anderen erforscht worden wären, Philosophen beilegten, die niemals dieselbe reclamirt hätten und reclamiren könnten, weil ihre Schriften darüber mehrere Jahre später als 1806 erschienen wären. Berzelius[1]), der sich einigermaassen von diesen Worten getroffen fühlte, machte dem gegenüber darauf aufmerksam, dass er schon im Augusthefte des Jahres 1803 von Gehlen's Journal der Chemie eine Abhandlung unter dem Titel „Versuche über die Wirkungen der elektrischen Säule auf Salze und auf einige ihrer Basen" veröffentlicht habe, worin der Grundgedanke des elektro-chemischen Systemes ausgesprochen sei. Zum Beweise führt er die folgenden Stellen an: 1) „Wenn sich die elektrische Säule durch eine Flüssigkeit entladet, so trennen sich die Bestandtheile einer solchen Flüssigkeit auf eine solche Weise, dass sich die einen um den positiven Pol, die anderen um den negativen Pol ansammeln. 2) Die zu einem und demselben Poldraht gehenden Stoffe stehen unter sich in einer gewissen Analogie. Zu dem negativen Pole gehen alle brennbaren Körper, Alkalien und Erden, zu dem positiven dagegen Sauerstoff, Säuren und oxydirte Körper." „Wir wagen kein Raisonnement über das wie, wodurch die erwähnten Zersetzungen bewirkt werden. Doch scheint es uns am natürlichsten, sie durch Attraction der Elektricität auf die einen und Repulsion derselben auf die anderen Stoffe zu erklären, obgleich uns diese Erklärung wenig genügend erscheint." Berzelius bemerkt, dass Davy diese Abhandlung (wenn auch nur einen Auszug in den Ann. de chim. et de phys. LI, 1804) gelesen und sich sogar das Verdienst zugesprochen, zuerst auf dieselbe aufmerksam gemacht zu haben. Indessen kommt Kopp[2]) bei genauer Betrachtung doch zu dem Resultate, dass Davy in der Entwickelung der elektrochemischen Theorie zuerst und noch vor Berzelius[3]) zu bestimmten, festen Ansichten gelangt sei.

Bei aller Anerkennung aber, welche die elektrochemische Theorie zu ihrer Zeit unter Chemikern und Physikern fand, ist dieselbe doch zu keiner Zeit von Schwierigkeiten ganz frei gewesen. Nach dieser Theorie musste die elektrische Polarität aller Atome, die ursprüngliche Eigenschaft und ihre chemische Qualität erst durch diese bedingt sein. Je mehr man jedoch die Wirkungen der Volta'schen Apparate

---

[1]) Jahresberichte über die Fortschritte der Physik und Chemie VIII, S. 21 bis 24.

[2]) Hermann Kopp, die Entwickelung der Chemie in der neueren Zeit, München 1873, S. 500 bis 509.

[3]) Jöns Jacob Berzelius (29. August 1779 Väfversunda Sörgärd, Stift Linköping — 7. August 1848 Stockholm) Professor der Medicin und Pharmacie in Stockholm, seit 1808 Mitglied der Akademie der Wissenschaften daselbst, seit 1818 deren beständiger Secretär. Für unser Werk haben wir vielfach von ihm benutzt: „Jahresberichte über die Fortschritte der Physik und Chemie", übersetzt von Gmelin, Wöhler u. A., 1821 bis 1848.

Volta'sche Batterie, c. 1800 bis c. 1820.

verstärken lernte, desto mehr neigten einige Physiker zu der Meinung, dass die chemische Thätigkeit die ursprüngliche und die elektrischen Erscheinungen nur die Folgen seien. Die Contacttheorie Volta's schien diesen Männern wenig geeignet zu sein, die immerwährenden Ströme in der Volta'schen Säule und damit die unaufhörliche Erzeugung von Kraft in derselben zu erklären. Sie meinten, man könne nur die chemische Differenz der in der Säule zur Berührung kommenden Metalle und Flüssigkeiten als die Quelle aller Kraft und damit auch als die Ursache aller Elektricität ansehen. Der Volta'schen Contacttheorie, die die Ursache der galvanischen Elektricität nur in dem Contacte der Metalle suchte, begann sich damit eine chemische Theorie, welche die Quelle der Elektricität nur in der chemischen Veränderung der Metalle finden wollte, entgegenzusetzen. Fabbroni, Ritter u. A. neigten entschieden der letzteren zu; Parrot bildete diese Theorie zuerst systematischer aus. Doch sonderten sich die Ansichten bewusster erst später; wir werden dann auf diesen Streit zwischen Contact- und chemischer Theorie, der vielfach auf Wortgezänk und rechthaberische Spitzfindigkeiten hinauslief, wieder zurückkommen müssen.

Die eifrigen Beschäftigungen mit den Wirkungen der Volta'schen Apparate regte natürlich viele Versuche zu Verbesserungen derselben an. Die säulenförmigen Apparate zeigten sich bald als wenig praktisch. Das Auseinandernehmen und das Reinigen der Platten, welches bei der geringen Dauer der Wirksamkeit der Apparate recht häufig vorzunehmen war, erwies sich als recht unbequem und sehr zeitraubend, so dass die Bemühungen der Physiker sich fast nur auf die Verbesserungen der Becherapparate richteten. Cruikshank[1]) liess sich aus gedörrtem Holze eine Art von Trog machen, der 26 Zoll lang, 1,7 Zoll tief und 1,5 Zoll breit war. In die langen Wände dieses Troges wurden Falzen geschnitten, jede ungefähr 0,1 Zoll tief und so breit, dass zwei auf einander gelöthete Platten von Zink und Silber sich genau in dieselben einschieben liessen. Die Falzen hatten eine solche Entfernung von einander, dass der Trog genau 60 Plattenpaare fasste. Die zusammengelötheten Platten wurden mittelst eines Kittes aus Harz und Wachs völlig wasserdicht in den Trog gekittet, ein Umstand, der von wesentlichem Einflusse auf die Güte der Maschine war. Die Zellen oder die Zwischenräume zwischen den Plattenpaaren füllte Cruikshank mit salzsaurem Ammoniak. Um nach dem Gebrauche die Metalle zu reinigen, brauchte man dann nur in die Zellen verdünnte Salzsäure zu giessen und sie einige Minuten darin stehen zu lassen[2]). Diese Trogapparate wurden sehr viel angewandt. Davy stellte mit ihnen seine erwähnten berühmten Zersetzungsversuche an. Napoleon I. schenkte dem Pariser polytechnischen Institut einen solchen Trogapparat, der 600 quadratische

[1]) William Cruikshank, 1745—1800, Arzt und Chemiker.

[2]) Gilbert's Ann. VII, S. 99.

Platten, jede von 0,3 m Seitenlänge, enthielt [1]). Wilkinson [2]) verbesserte diese Trogapparate nochmals bedeutend, indem er sie in der äusseren Einrichtung unseren heutigen Tauchbatterien annäherte. Er theilte den Trog statt durch Plattenpaare durch hölzerne Zwischenwände, die fest in den Trog verkittet waren. Je eine Kupferplatte und eine Zinkplatte verband er dann durch einen angelötheten Drahtbogen, so dass diese Platten in zwei benachbarte Zellen getaucht werden konnten. Jeder Drahtbogen aber hatte oben einen Ring, und wenn man durch alle Ringe einen Stab steckte, so konnte man sämmtliche Platten, falls sie nicht gebraucht oder gereinigt werden sollten, auf einmal aus dem Troge heben. Nach einem ähnlichen Principe arbeitete dann Children [3]) seine kolossalen Trogapparate. Ein solcher aus 2000 Plattenpaaren wurde von Freunden und Gönnern der Royal Institution in London geschenkt und dort Ende Juli 1810 von Davy zum ersten Male in Thätigkeit gesetzt [4]).

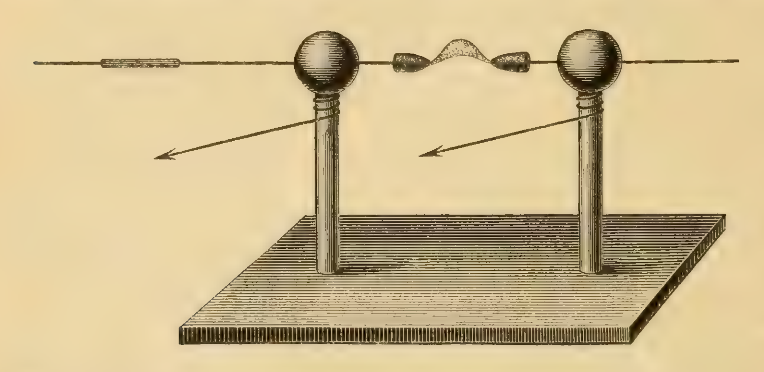
Volta'sche Batterie, c. 1800 bis c. 1820.

Die stärkeren galvanischen Wirkungen, welche man mit den grösseren Apparaten erhielt, liessen bald alle Meinungen verstummen, die noch mehr oder weniger laut die elektrische Natur der galvanischen Erscheinungen angezweifelt hatten. Sie zeigten bald unverkennbar, dass alle Wirkungen der Reibungselektricität auch durch den galvanischen Strom hervorgebracht werden könnten. Die Abstossung leichter Körper durch galvanische Elektricität hatte schon Volta am Elektrometer gezeigt, jetzt konnte man auch die elektrischen Funken, an die man sich bei der Reibungselektricität so sehr gewöhnt, bei den Volta'schen Apparaten leicht nachweisen. Nicholson hatte zuerst an seiner Säule von 100 Kronenstücken wenigstens im Finstern einen Funken bemerkt. Cruikshank machte mit einer ähnlichen Säule die Funken am Tage sichtbar; auch Simon [5]) und Ritter erhielten schon 1801 starke Funken durch den elektrischen Strom. Davy, ebenso wie Foucroy, Vauquelin und Thénard machten darauf aufmerksam, dass die Funken am meisten durch die Vergrösserung der Platten verstärkt würden. Die Erwärmung von Drähten und das Glühendwerden derselben durch den galvanischen Strom beobachteten Simon, Pfaff und Marum. Davy brachte einen Eisendraht von 2 Zoll Länge und $^1/_{170}$ Zoll Durchmesser zum Schmelzen. Alle diese Licht- und Wärmewirkungen des Stromes aber verschwanden gegen das elektrische Bogenlicht, welches Davy mit der schon erwähnten grossen Batterie der Royal Institution noch vor dem Jahre 1812 erzeugte [6]). In seinen Elements of chemical philosophy (London 1812, S. 152 bis 154) sagt er darüber: „Diese Batterie . . . bringt eine

[1]) Albrecht, Geschichte der Elektricität, S. 163. — [2]) Charles Henry Wilkinson, Wundarzt in London. — [3]) John George Children, 1778—1852. — [4]) Gilb. Ann. XXXVII, S. 51, 1811. — [5]) Paul Louis Simon, 1767—1815, Oberbaurath in Berlin. — [6]) Curtet hatte schon 1802 bemerkt (Gilb. Ann. XII, S. 361): „Holzkohle, die auf einer Zink-Silber-Säule lag, gab, wenn ein Eisendraht, in dem durch ihn die Kette geschlossen war, mit ihr in Berührung kam, so lebhafte, sprühende Funken, dass die anliegenden Gegenstände dadurch bis zu $1^1/_2$ Zoll mit einem weissen Licht beleuchtet wurden."

Volta'sche Batterie, c. 1800 bis c. 1820.

Reihe von glänzenden und auffallenden Erscheinungen hervor. Wenn Holzkohlenstückchen von 1 Zoll Länge und $^1/_6$ Zoll im Durchmesser bis auf $^1/_{30}$ oder $^1/_{40}$ Zoll Entfernung einander nahe gebracht (in die Kette eingeschaltet) waren, so wurde ein glänzender Funke hervorgebracht und mehr als die Hälfte der Kohlenstückchen erhitzte sich bis zur Weissgluth. Entfernte man hierauf die Kohlenspitzen von einander, so erfolgte zwischen denselben durch die erhitzte Luft bis auf eine Entfernung von wenigstens 4 Zoll eine constante Entladung in einem ausserordentlich glänzenden, nach oben gerichteten, breiten Lichtbogen von conischer Form [1]). Jede Substanz, die man in den Bogen brachte, wurde sogleich glühend; Platina schmolz in ihm so schnell, wie Wachs in einer gewöhnlichen Kerzenflamme; Quarz, Saphir, Magnesia, Kalk wurden flüssig;



Diamantsplitter, Holzkohlen- und Graphitstückchen verschwanden rapid und schienen sich in dem Bogen zu verflüchtigen. . . . Wenn die Pole der Batterie in verdünnter Luft in Verbindung gesetzt wurden, so vergrösserte sich die Entfernung, auf welche hin die Entladung noch stattfand, in demselben Maasse, als die Verdünnung zunahm; war die letztere bis zu nur noch $^1/_4$ Zoll Quecksilberdruck vorgeschritten, so gingen die Funken bis auf $^1/_2$ Zoll Entfernung über, und entfernte man die Pole bis auf 6 bis 7 Zoll von einander, so erfolgte die Entladung in einem ausserordentlich schönen, purpurfarbenen Lichtstrome."

Merkwürdiger Weise erregten diese Entdeckungen nicht das allgemeine Aufsehen, welches man hätte erwarten dürfen. Praktisch wusste man bei der Kostspieligkeit der anzuwendenden Batterien mit ihnen nichts anzufangen, und theoretisch erschien die kolossale Wärme- und Lichtproduction des galvanischen Stromes bei der geltenden materiellen Theorie der Wärme beunruhigend und unbequem. Darauf lassen die Worte Biot's [2]) schliessen, die er über das Glühen von Drähten durch den elektrischen Strom sagt: „Es ist ausnehmend schwer, um nicht zu sagen unmöglich, die Entstehungsart dieser Licht-

---

[1]) Die folgende Figur ist eine Skizze nach der Originalfigur Davy's.

[2]) Lehrbuch der Experimentalphysik, Leipzig 1824, II, S. 320.

erscheinung und Erhitzung unter solchen Umständen anzugeben. Soll man sie von einer Zusammendrückung der Substanzen herleiten, auf welche die Elektricität wirkt? Dann aber scheint es, als ob, weil der Strom anhaltend fortgeht, der Druck bloss ein für alle Mal zu Anfange des Versuches ausgeübt werden müsste; und somit könnte man ihm höchstens das erste Hervorbrechen des Lichtes, keineswegs aber seine fernere Dauer beimessen. Sollten wohl die beiden elektrischen Principien unmittelbar durch ihr Zusammentreffen Licht erzeugen?" Der letzteren Meinung, die ebenso vorsichtig als dunkel und im Munde eines Anhängers des Wärmestoffes eigentlich unverständlich ist, schlossen sich trotzdem die damaligen Physiker an. Dass diese aber mit derselben doch nicht viel Ruhm zu ernten hofften, ersieht man aus dem Schweigen, das fortan über dieses Thema beobachtet wurde.

Volta'sche Batterie, c. 1800 bis c. 1820.

Einzelne akustische Abhandlungen waren bis zum Ende des 18. Jahrhunderts schon in Menge erschienen. Untersuchungen über Consonanz und Dissonanz der Intervalle, Messungen der Schallgeschwindigkeit, mathematische Ableitungen der Gestalten schwingender Saiten gehörten zu verschiedenen Zeiten zu den Lieblingsbeschäftigungen der Physiker. In der letzten Hälfte des Jahrhunderts noch hatten Dan. Bernoulli und Euler die Schwingungen von Stäben, Euler und Riccati die Schwingungen von gespannten Membranen behandelt. Dan. Bernoulli, Euler, Lambert, Riccati hatten die Töne der Pfeifen genauer untersucht; Lagrange auch seine berühmten akustischen Abhandlungen in den Turiner Memoiren veröffentlicht. Eine erschöpfende systematische Behandlung aber, wie schon häufiger die Mechanik oder die Optik sie erfahren hatten, fehlte der **Akustik** bis dahin noch gänzlich; eine umfassende Bearbeitung dieser letzteren, als einer einheitlichen physikalischen Disciplin gab erst Chladni[1]), der „Vater der Akustik".

Akustik, Chladni c. 1800.

---

[1]) Ernst Florens Friedrich Chladni wurde am 30. November 1756 in Wittenberg geboren Auf Wunsch seines Vaters, der Professor der Rechte war, studirte er Jura in Wittenberg und Leipzig, wandte sich aber nach dessen Tode ganz den Naturwissenschaften zu. Im 19. Jahre fing er erst an Klavier zu spielen und las verschiedene Schriften über die Tonkunst, wobei er zu der Ueberzeugung kam, „dass darin am meisten zu entdecken sein würde, weil ihre mathematisch-physikalischen Voraussetzungen weit mangelhafter wären, als sonst in der Naturkunde". Euler's und Bernoulli's Schriften führten ihn auf die Untersuchung tönender Scheiben, Lichtenberg's Entdeckungen der elektrischen Staubfiguren brachten ihn auf die Entdeckung der Klangfiguren. Dabei wurde aber seine Lage pecuniär traurig, das Vermögen seiner Mutter („so mag ich meine Stiefmutter schicklicher bezeichnen") schwand allmählich. Da er von Jugend auf reiselustig gewesen, versuchte er ein Toninstrument zu erfinden, mit dem er wie ein Virtuos Kunstreisen machen könnte. Ein solches, das Euphon, war am 8. März 1790 vollendet. Vorträge auf diesem und einem zweiten Instrumente, dem Klavicylinder, sowie Lehrvorträge über akustische Gegenstände, die er auf Reisen erst durch Deutschland, dann auch durch Frankreich und Italien hielt, lieferten ihm reichliche Mittel für seinen Unterhalt.

Akustik, Chladni, c. 1800.

Was bis dahin in der Akustik geschehen war, das rührte entweder von Musikern her, die sich für Töne und Toninstrumente auch theoretisch interessirten, oder von Mathematikern, welche die akustischen Probleme als interessante, mathematische Aufgaben betrachteten. Akustische Erscheinungen, um ihrer selbst willen, waren, soweit sie nicht musikalisches oder mathematisches Interesse erweckten, mit geringen Ausnahmen noch nicht in Behandlung genommen worden; eine experimentelle Durchprüfung des ganzen Gebietes des Schalles, eine experimentelle Akustik schuf erst Chladni. Das heben die Gebrüder Weber mit vollem Rechte hervor, wenn sie ihrer berühmten Wellenlehre von 1825 die Widmung vorsetzen: „Unserem verehrten Freunde Chladni, dem Begründer einer auf Versuchen beruhenden Akustik, dem Erfinder einer neuen Classe musikalischer Instrumente, dem ersten Erforscher der auf die Erde niedergefallenen meteorischen Massen".

Chladni selbst nimmt in der Vorrede seines Hauptwerkes, welches 1802 unter dem Titel „Die Akustik" in Leipzig erschien, als neu für sich in Anspruch: den Plan des Werkes, „wobei nicht, wie gewöhnlich, etwa bloss oder vorzüglich auf die Saiten, sondern vielmehr auf alle möglichen Arten von klingenden Körpern in gleichem Grade Rücksicht genommen ist"; die Behandlung der Schwingungen von Scheiben, Glocken, Ringen und Gabeln; die Entdeckung der Longitudinalschwingungen von Saiten und Stäben, sowie deren Anwendung zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern; die Entdeckung der drehenden Schwingungen eines Stabes; die Auffindung der Gesetze der Töne einer brennenden Wasserstoffflamme; die Bestimmung der Schwingungsanzahl durch unmittelbares Abzählen; die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Gasarten und endlich die Erfindung des Euphons und des Klavicylinders. Wir werden im Folgenden diese Ansprüche mehr als gerechtfertigt finden.

„Die meisten Schriftsteller berechnen (zu Chladni's Zeit noch immer) die Töne nach den ihnen zukommenden Saitenlängen"; Chladni macht auf die Nothwendigkeit aufmerksam, an Stelle der Saitenlängen, die doch nur als Verhältnisszahlen zu gebrauchen sind, die absoluten Schwingungszahlen der Töne zu setzen. Zum Zählen der Schwingungen eines Tones, als „Tonmesser oder Tonometer", gebraucht er am liebsten einen parallelepipedischen Stab von 2 Ellen Länge, $^1/_2$ Zoll Breite und 1 Linie Dicke, der zur Erzeugung überall gleicher Stärke durch ein

---

Er starb am 3. April 1827 in Breslau. Der Armencasse seiner Vaterstadt vermachte er sein nicht unbedeutendes Vermögen, dem königlichen Mineraliencabinet in Berlin seine kostbare Sammlung von Meteorsteinen. „Erfindungskraft, reger Witz und Gutmüthigkeit zeichneten ihn vor Allen aus." Vergl. Franz Melde, Chladni's Leben und Wirken, Marburg 1866.

Streckwerk gegangen. Diesen Stab spannt er in einen Schraubstock derart ein, dass er Schwingungen macht, langsam genug, um dieselben zwar nicht hören, wohl aber sehen und zählen zu können. Will man danach die Schwingungszahl irgend eines bestimmten Tones finden, so stimmt man den Stab durch Verschieben desselben im Schraubstocke auf den betreffenden Ton ein und berechnet die Schwingungszahl desselben nach der Proportion: Die Zahlen verhalten sich bei einem und demselben Stabe umgekehrt wie die Quadrate der Länge der schwingenden Theile.

Akustik, Chladni, c. 1800.

Obgleich die grossen Mathematiker in der Mitte des 18. Jahrhunderts die Gestalten schwingender Saiten mit Eifer und Ausdauer behandelt, gelang es doch Chladni gerade hier zu ganz neuen Ergebnissen zu gelangen. Jene Mathematiker hatten, weil sie nur bemüht waren, alle möglichen verschiedenen Formen der schwingenden Saiten aufzufinden, immer angenommen, dass die einzelnen Theile derselben senkrecht zur Längsrichtung der Saiten sich bewegten. Chladni zeigte die Möglichkeit von Schwingungen, bei denen die einzelnen Theile der Saite nicht aus der Richtung der Saite heraustraten. Er machte diese Entdeckung schon in seiner ersten Abhandlung „Neue Entdeckungen über die Theorie des Klanges" (Leipzig 1787) und ausführlicher 1792 in der Berliner musikalischen Monatsschrift und mehreren folgenden Abhandlungen bekannt. Danach erhält man von einer Saite ganz andere Töne, wenn man dieselbe mit einem Violinbogen senkrecht zu ihrer Richtung, als wenn man sie unter einem möglichst spitzen Winkel anstreicht, oder noch besser die mit Geigenharz eingeriebene Saite mit einem Tuchlappen oder dem Finger der Länge nach reibt. Im ersteren Falle schwingen die einzelnen Theile der Saite senkrecht zu ihrer Richtung, im letzteren aber in dieser Richtung selbst; Chladni nannte die Schwingungen erster Art Transversal-, und die von ihm entdeckten zweiter Art Longitudinalschwingungen [1]). Wenn die Saite ihren tiefsten Longitudinalton, den Grundton, giebt, so schwingen alle Theile derselben zu einer Zeit nach derselben Richtung. Die Saite kann sich aber auch wie bei den Transversalschwingungen in Theile theilen und Obertöne geben. Beim ersten Oberton, wo ein Schwingungsknoten in der Mitte der Saite liegt, bewegen sich die Theilchen in den beiden Hälften entgegengesetzt, also alle zu gleicher Zeit nach dem Knoten hin oder von ihm weg, u. s. w. Die Longitudinaltöne sind immer beträchtlich, oft um mehrere Octaven höher als die Transversaltöne derselben Saiten; ein bestimmtes Verhältniss zwischen den beiden Arten der Töne liess

[1]) Chladni hat in der Entdeckung der longitudinalen, wie der gleich zu erwähnenden drehenden Schwingungen keine Vorläufer. Nach seiner eigenen Angabe hat nur Riccati (Delle corde, Bologna 1767) bemerkt, dass eine Saite, die an einem Ende aufgehängt und an dem anderen Ende mit einem Gewichte beschwert ist, sich abwechselnd ausdehnt und zusammenzieht.

Akustik, Chladni, c. 1800.

sich im Allgemeinen nicht finden. Die Geschwindigkeiten der Longitudinalschwingungen stehen im umgekehrten Verhältnisse zu den Längen der Saiten; die Dicke und die Spannung derselben zeigte sich merkwürdigerweise ohne Einfluss, dafür aber wirkte das Material sehr entscheidend ein. Bei Stäben liessen sich die Obertöne der Longitudinalschwingungen noch leichter als bei Saiten hervorbringen. Um den Grundton zu erhalten, spannt man am besten einen Glasstab mit einem Ende in einen Schraubstock und reibt am anderen Ende mit einem nassen Tuche, auf das man feinen Sand oder Bimsstein gestreut. Um den ersten Oberton hervorzubringen, braucht man nur den Stab mit den Fingern in der Mitte zu berühren; er ist natürlich die Octave des ersten Tones. Chladni giebt die Longitudinaltöne eines 2 Fuss langen Stabes für 26 Substanzen an, unter denen sich auch Fischbein, Zinn, viele Hölzer und sogar ein thönerner Pfeifenstiel befinden.

An Stäben entdeckte Chladni noch eine dritte Art von Schwingungen, die er 1799 in dem zweiten Bande der Schriften der Gesellschaft naturforschender Freunde in Berlin beschrieb. Er nannte dieselben „drehende Schwingungen“ und brachte sie an recht glatten cylindrischen Stäben dadurch hervor, dass er diese Stäbe von rechts nach links in drehender Richtung rieb. Auch hierbei theilte sich der Stab, je nachdem er gehalten wurde, wie bei den Longitudinalschwingungen, in Theile. Ueberhaupt entsprachen die drehenden Schwingungen in ihren Gesetzen ganz den Longitudinalschwingungen, nur waren die Töne bei sonst gleichen Verhältnissen um eine Quinte tiefer. Diese Angabe, nach welcher die Schwingungszahlen beider Schwingungsarten das Verhältniss $\frac{3}{2}$ halten müssten, ist später berichtigt worden. Muncke[1]) fand aus seinen Versuchen für dieses Verhältniss die Zahl 1,6 (entsprechend der grossen Sexte). Poisson[2]) leitete durch theoretische Betrachtungen, gegründet auf die Gesetze der Elasticität, den Werth $\frac{1}{2}\sqrt{10}$ oder 1,5811 ab. Nach W. Weber[3]) stimmen diese letzteren Werthe mit den Resultaten seiner Experimente genügend überein.

Die Untersuchung der Schwingungen gerader Stäbe dehnte Chladni auf die gebogener aus. Er zeigte, dass bei einer Stimmgabel, wenn sie den tiefsten Ton giebt, zwei Schwingungsknoten nahe an einander zu beiden Seiten des Stieles liegen und dass der Ton ungefähr eine Sexte tiefer ist, als der transversale Grundton des freien Stabes. Auch Stäbe, die zu einem vollständigen Ringe gebogen, sowie Glocken wurden auf ihre Schwingungen untersucht und einige Euler'sche (Act. Petr. 1779)

---

[1]) Gehler's phys. Wörterb. VIII, S. 215.

[2]) Ann. de chim. et de phys. XXXVI, p. 88, 1827; Mém. de l'Acad. VIII, 1829.

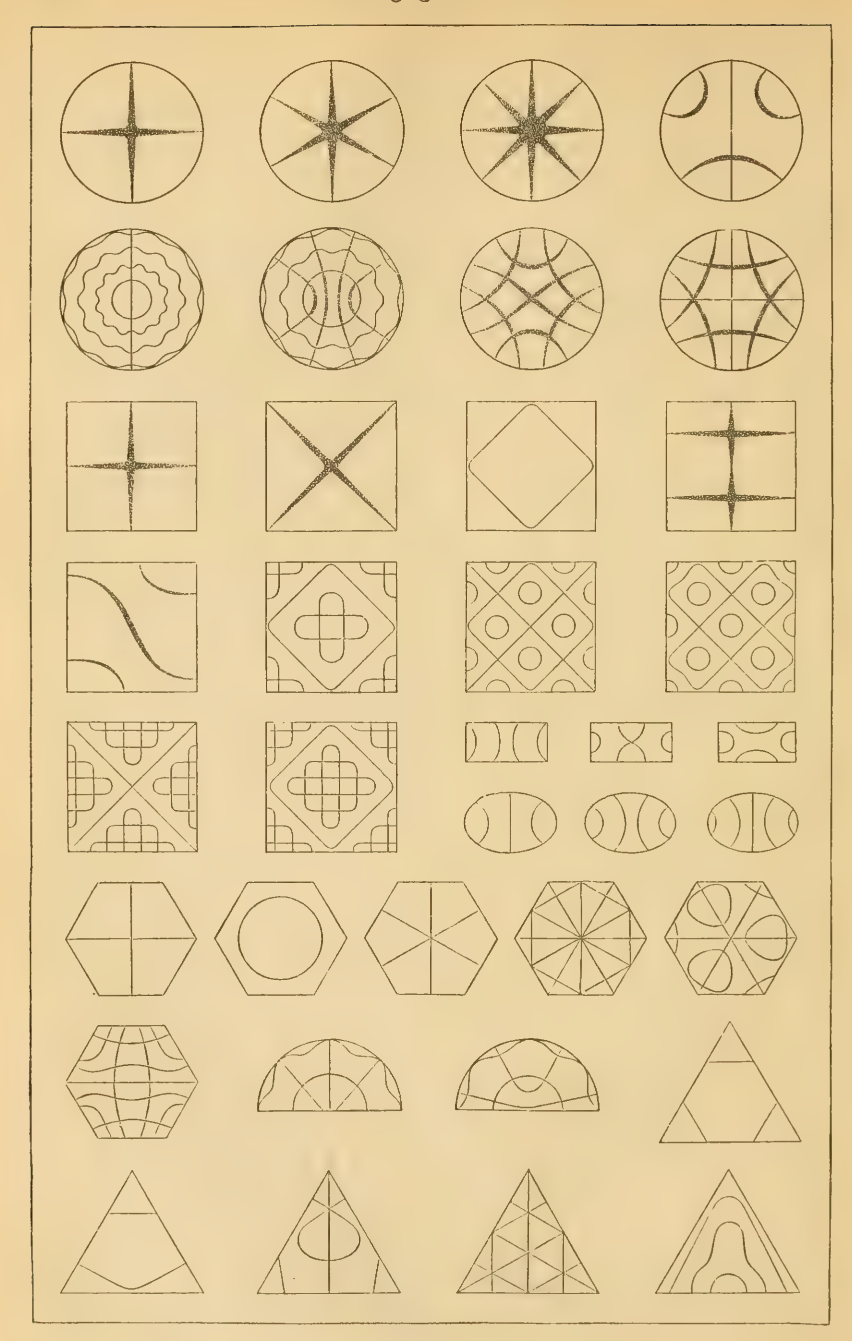
[3]) Poggendorff's Annalen XIV, S. 175.

und Golowin'sche (Act. Petr. 1781) hierher gehörige theoretische Erwägungen durch experimentelle Ergebnisse berichtigt.

Akustik, Chladni, c. 1800.

Mehr Aufsehen als alle vorerwähnten Entdeckungen erregten Chladni's Arbeiten über schwingende Platten und die Entdeckung der Klangfiguren. Die erste Nachricht davon gab er ebenfalls schon in seinem Erstlingswerke, in den „Entdeckungen über die Theorie des Klanges“ von 1787, in der Akustik von 1802 besprach er dieselben ausführlicher, und schliesslich gab er noch Nachträge in der späteren Schrift „Neue Beiträge zur Akustik“ (Leipzig 1817). Die Erzeugung dieser Klangfiguren ist so bekannt und wird fast in jedem Lehrbuche der Physik so genau beschrieben, dass ich sie hier übergehen kann; ich gebe statt dessen lieber eine Sammlung von Abbildungen aus Chladni's Akustik, etwas vollständiger, als man sie sonst wohl findet. Dieselbe enthält indessen noch immer nur eine geringe Anzahl der von Chladni aufgezeichneten Figuren. Schon 1787 gab er 138 Bilder von quadratischen und kreisrunden Scheiben; die Akustik von 1802 enthält 190 Bilder von Klangfiguren, und bis 1817 hatte er die Zahl derselben noch wieder vermehrt. Wie viel Chladni von seinen Klangfiguren hoffte, ersieht man aus dem Anfange seiner Abhandlung „Entdeckungen über die Theorie des Klanges“: „Die elastischen Schwingungen der Saiten und Stäbe, bei welchen man nur auf einzelne krumme Linien Rücksicht zu nehmen hat, sind von Verschiedenen so genau und scharfsinnig berechnet, dass sich wohl sehr wenig neues darüber möchte sagen lassen; dahingegen die wahre Beschaffenheit des Klanges solcher Körper, bei denen elastische Krümmungen ganzer Flächen nach mehreren Dimensionen zugleich in Betracht kommen, noch in die tiefste Dunkelheit gehüllt ist; indem weder Berechnungen, die mit der Erfahrung übereinstimmen, noch richtige Beobachtungen darüber vorhanden sind. Da es mir gelungen ist, ein Mittel zu entdecken, um jede mögliche Art des Klanges solcher Körper, ohne Beimischung anderer, nicht nur hörbar, sondern auch sichtbar darzustellen; so hoffe ich, durch Bekanntmachung meiner Beobachtungen wenigstens einige richtige Voraussetzungen zu genauerer Untersuchung dieses noch sehr unbearbeiteten Theiles der Mechanik liefern zu können, und ich bin versichert, dass Jeder die Unvollkommenheit meiner Bemerkungen entschuldigen werde, wer aus eigener Erfahrung weiss, wie viele Schwierigkeiten sich Einem, der auf ungebahnten Wegen die Natur beobachten will, bei jedem Schritte entgegenstellen.“ Der Erfolg entsprach auch, wenigstens bei der Aufnahme durch das gelehrte Publikum, den Erwartungen. Chladni's Vorlesungen und Experimente über diesen Gegenstand wurden überall mit Enthusiasmus aufgenommen; Gelehrte wie Dilettanten wiederholten die Versuche mit grossem Eifer. Als Chladni im Jahre 1809 seine Figuren den Mitgliedern des französischen Nationalinstitutes vorführte, erregten sie die





Bewunderung Aller, besonders auch die von Laplace. Napoleon liess sich die Versuche in den Tuillerien wiederholen und wies danach 6000 Frcs. für Chladni an, damit dieser eine Uebersetzung seiner Akustik ins Französische besorgen könne.

Akustik, Chladni, c. 1800.

Trotzdem lässt sich nicht verkennen, dass diese Entdeckungen für die Theorie des Schalles nicht ganz den erwarteten Nutzen gebracht haben; einmal darum, weil sie sich direct nur auf ein ganz specielles Problem, das der schwingenden Platten, anwendbar zeigten, und ein anderes Mal darum, weil die Theorie wenig mit diesen experimentellen Ergebnissen anzufangen wusste. Noch 1787 hatte Jacob II. Bernoulli (Nov. Act. Petr., V, 1787) versucht, die Gestalt einiger Klangfiguren theoretisch abzuleiten, indem er die rechtwinkelige Scheibe als ein netzförmiges Gewebe von Fasern betrachtete, die einander rechtwinkelig durchkreuzen. Chladni zeigte aber, dass die erhaltenen Resultate mit der Erfahrung nicht übereinstimmten. Nach Chladni's Demonstrationen vor dem französischen Institute im Jahre 1809 setzte dieses einen Preis von 3000 Frcs. für eine analytische Lösung des Problems aus, musste aber die Ausschreibung noch zweimal wiederholen und ertheilte endlich 1816 der einzigen eingesandten Arbeit den Preis, einer Abhandlung von Sophie Germain, in der sich einige richtige Differentialgleichungen und einige neuere Untersuchungen befanden [1]). Auch Poisson [2]) hatte bei seinen Bemühungen um dieses Problem nur geringen Erfolg, und erst Wheatstone [3]) gab 1833 eine Theorie, nach der sich wenigstens die einfachsten Klangfiguren richtig ableiten liessen.

Von Chladni rühren auch die ersten Versuche über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in Gasen her. Abgesehen von der kaum ausführbaren directen Messung, gab es zur Bestimmung dieser Fortpflanzungsgeschwindigkeit zwei Wege. Seit Dan. Bernoulli's Arbeiten aus dem Jahre 1762 [4]) war bekannt, dass in offenen Pfeifen ein Schwingungsknoten in der Mitte, ein Schwingungsbauch am Ende derselben liegt; so dass also, wenn die Pfeife ihren Grundton ausgiebt, die Wellenlänge des Tones doppelt so gross ist, als die Länge der Pfeife selbst, während bei gedeckten Pfeifen die Wellenlänge das Vierfache der Pfeifenlänge ist. Da nun Newton schon gezeigt hatte, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bei allen Schwingungen dem Producte aus der Schwin-

---

[1]) Gehler's phys. Wörterb. VIII, S. 261. Vergl. Kirchhoff, Wissenschaftl. Abh., Leipzig 1882, S. 237.

[2]) Sur l'équilibre et le mouv. des corps élast.; Mém. de l'Acad. VIII, 1829.

[3]) Charles Wheatstone, On the figures obtained by strewing sand on vibrating surfaces. (Phil. Trans. 1833.)

[4]) Dan. Bernoulli, Sur le son et sur les tons des tuyaux orgues (Mém. Par. 1762). Ferner Lambert, Observations sur les flûtes (Berl. Mém. 1775); L. Euler, De motu aëris in tubis (Nov. Comm. Acad. Petr. XVI, 1772); Lagrange, Recherches sur la propagation du son (Misc. Soc. Taur. I und II, 1759 und 1762).

Akustik, Chladni, c. 1800.

gungszahl und der Wellenlänge gleich ist, so liess sich offenbar aus der Länge einer Pfeife und der Schwingungszahl ihres Tones die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in dem Gase, welches in der Pfeife tönte, berechnen. Chladni bediente sich zu dem Zwecke einer offenen zinnernen Orgelpfeife, die auf einer gläsernen durch Wasser abzusperrenden Glocke befestigt war. Mit der Glocke stand eine thierische Blase in Verbindung, welche die zu prüfende Gasart enthielt. Zur besseren Vergleichung wurde allezeit zuerst atmosphärische Luft angewandt und der in dieser erzeugte Ton mit Hülfe eines Monochords genau bestimmt. Der zweite Weg führt kürzer zum Ziele. Nach Newton ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen in verschiedenen elastischen Mitteln den Quadratwurzeln aus den specifischen Gewichten der betreffenden Gase umgekehrt proportional. Da nun die specifischen Gewichte der Gase, wie auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft schon bekannt sind, so lassen sich auch daraus die entsprechenden Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in den Gasen leicht berechnen. Die Resultate, welche Chladni auf den beiden angedeuteten Wegen erhielt, stellt die folgende Tabelle dar.

| | Dichte | Geschwindigkeit in par. Fuss | |
|---|---|---|---|
| | | beobachtet | berechnet |
| Atmosphärische Luft | 1000 | 1038 | |
| Sauerstoff | 1103 | 950—960 | 988 |
| Stickstoff | 985 | 990 | 1045 |
| Wasserstoff | 84 | 2100—2500 | 3580 |
| Kohlensäure | 1500 | 840 | 847 |
| Salpetergas | 1195 | 980 | 949 |

Die Resultate zeigen Abweichungen, die nicht durch Ungenauigkeiten in den Messungen allein erklärt werden können. Benzenberg[1]) fand auch bei eigenen, wie bei Messungen von Kerby und Merrick[2]), die in ähnlicher Weise wie von Chladni angestellt wurden, immer nahezu dieselben Abweichungen von den nach dem Newton'schen Gesetze berechneten Werthen. Gilbert[3]) erklärte die Abweichungen durch die nur schwer zu vermeidende Unreinheit der Gase und wies

---

[1]) Gilbert's Annalen XLII, S. 12, 1812.

[2]) Gilbert's Annalen XXXIX, S. 438, 1811.

[3]) Ludwig Wilhelm Gilbert, 1769—1824, Professor der Physik, erst in Halle, dann (1811) in Leipzig. Besonders verdient durch die Herausgabe der „Annalen der Physik und Chemie" von 1799 bis 1824, in deren Heften sich viele Aufsätze, Bearbeitungen und Uebersetzungen von ihm befinden.

darauf hin, dass bei der Kohlensäure, die am leichtesten rein zu erhalten, die Versuche am besten stimmten. Auch der verschiedene Feuchtigkeitsgehalt der Gasarten, meinte er, möge wohl an den Differenzen mit Schuld sein. Untersuchungen der Neuzeit haben indessen gezeigt, dass diese Abweichungen nicht zufällig, sondern durch die Röhrenwände zum grössten Theile verursacht sind.

Akustik, Chladni, c. 1800.

Immerhin waren diese Abweichungen noch nicht so wunderbar, als die trotz aller Bemühungen nicht wegzuschaffenden Differenzen zwischen der beobachteten Geschwindigkeit des Schalles in freier Luft und dem von Newton hierfür berechneten Werthe[1]). Je mehr und je sorgfältiger man die Schallgeschwindigkeit in der Luft maass, desto mehr sah man ein, dass der Newton'sche Werth von 979 engl. Fuss in der Secunde unter keinen Umständen richtig sein könne; aber weder gelang es, diese Differenz zu erklären, noch vermochte man in der Newton'schen Entwickelung einen Fehler nachzuweisen. Noch in der letzten Zeit wieder, im Jahre 1778, hatten deutsche Gelehrte, wie Kästner und J. T. Mayer, die Schallgeschwindigkeit mit vieler Sorgfalt gemessen und in guter Uebereinstimmung mit den Resultaten der Pariser Akademie von 1738 für dieselbe 1034 bis 1037 par. Fuss gefunden. Chladni theilt folgende Erklärungsversuche für diese räthselhafte Abweichung mit[2]): 1) der Luft sind fremde Theile beigemengt, welche wohl das Gewicht derselben, aber nicht ihre Elasticität vermehren (Lambert, Berl. Mém. 1768); 2) die Geschwindigkeit der Luftschwingungen wird durch die Stösse der nachfolgenden Schwingungen vergrössert (Euler, conjectura phys. Berlin 1750; als unrichtig zurückgenommen De la propagation du son 1759); 3) stärkere Stösse der Luft pflanzen sich schneller fort als die theoretisch allein behandelten kleinen Erschütterungen; 4) die Elasticität der Luft ändert sich nicht ganz proportional mit der Dichte (Lagrange, Tur. Misc. II); 5) die Luft als eine Mischung von Stickstoff und Sauerstoff macht andere Schwingungen als die einfachen Gase. Dies letztere hält Chladni selbst für das Wahrscheinlichste, und er versucht auch die Veränderung des Klanges der Blasinstrumente in dicht von Menschen besetzten Sälen aus der Veränderung der Luftmischung in solchen Räumen abzuleiten. Dass alle diese Versuche aber ungenügend seien, ging schon daraus hervor, dass Keiner die Grundlage für die theoretische Ableitung der beobachteten Werthe geben konnte; darum fielen dieselben, sowie Laplace die noch heute als richtig angenommene Erklärung gab[3]). Nach J. Le Conte[4]) bemerkte Laplace

---

[1]) Siehe den zweiten Band dieses Werkes, S. 233.

[2]) Akustik, S. 224 bis 226.

[3]) Ann. de chim. et de phys. (2), III, p. 238, 1816; ibid. XX, p. 266; ausführlich in dem Traité de mécanique céleste, Vol. V, 1825.

[4]) On the adequacy of Laplace's explanation to account for the discrepancy between the computed and the observed velocity of sound in air and gazes; Phil. Mag. (4), XXVII, p. 1 bis 32, 1864.

Akustik, Chladni, c. 1800.

schon um das Jahr 1800, dass die Temperaturerhöhungen und -erniedrigungen, welche mit der Verdichtung und Verdünnung der Luft bei den Schallwellen verbunden sind, die Elasticität der Luft in einem stärkeren Verhältniss als die Dichte ändern und dass dadurch die Geschwindigkeit des Schalles beschleunigt werden muss. Er theilte diesen Gedanken auch alsbald Biot mit, der ihn noch 1802 im Journal de Physique, mathematisch aber nicht ganz richtig, wie Poisson 1808 [1]) nachwies, zu verwerthen suchte. Doch konnte auch Laplace erst nach langer Arbeit das genaue Resultat seiner Untersuchungen und damit die Lösung des Problems verkünden: „Die Geschwindigkeit des Schalles ist gleich dem Producte der Geschwindigkeit, welche die Newton'sche Formel giebt, in die Quadratwurzel aus dem Verhältniss der specifischen Wärme der Luft unter constantem Drucke zu ihrer specifischen Wärme bei constantem Volumen.“ Leider war gerade der Werth dieses Verhältnisses der specifischen Wärme so wenig genau bestimmt, dass ein Schluss aus der Richtigkeit des Resultates auf die Richtigkeit des Gesetzes nicht wohl möglich war. Es hat darum auch bis auf die neueste Zeit nicht an Physikern gefehlt, welche die Laplace'sche Idee nicht als richtig anerkennen und andere, besser stimmende Erklärungen geben wollten. Benzenberg, der im December 1809 und im Juni 1811 bei Düsseldorf die Schallgeschwindigkeit vielfach gemessen und als mittleres Resultat für die Temperatur von 0° C. den viel benutzten Werth von 1027 par. Fuss erhalten hatte, hielt diesen Werth für zu gross, als dass er durch die entstehende Compressionswärme erklärt werden könne [2]). Meikle meinte 1829, wenn die Compressionswärme die Fortpflanzung des Schalles beschleunige, so müssten stärkere Töne sich schneller fortpflanzen als schwache [3]). Ritchie bemerkte, dass die Wärme keinen Einfluss auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ausüben könne, weil die verdichteten Theile der Wellen sich nicht schneller fortpflanzen als die verdünnten [4]). Moon gab zu, das letztere sei allerdings der Fall, aber das Ohr sei nur für die verdichteten Wellen empfindlich [5]). Potter tadelte, Laplace habe gerade so richtig auf eine Retardation des Schalles als auf eine Beschleunigung schliessen können, da ja wie Wärme auch Kälte bei der Wellenbewegung der Luft entsteht [6]). Challis behauptete, die entstehende Wärme und Kälte müssten sich ausgleichen, auch werde nur bei der Bewegung der Luft in Röhren eine Erwärmung wirklich beobachtet, in freier Luft verliere sie sich zu schnell durch Strahlung [7]).

[1]) Mém. sur la théorie du son, Journ. d. l'école polyt. XIV, 1808.

[2]) Benzenberg's Messungen in Gilbert's Annalen XXXV, S. 385 bis 406 u. XXXIX, S. 136 bis 141 u. XLII, S. 1 bis 11; die letztere Behauptung XLII, S. 36.

[3]) Gehler's Wörterb. VIII, S. 424.

[4]) Philos. Mag. (3), X, 1837.

[5]) Ibid. (4), XVI, 1858.

[6]) Ibid. (4), I, 1851.

[7]) Ibid. (3), XXXII, 1848.

Akustik, Chladni, c. 1800.

Dem letzteren aber hielt Stokes entgegen, dass die Dichtigkeitsveränderungen zu schnell geschähen, als dass solche Ausgleichungen der Wärme und Kälte stattfinden könnten[1]). Nach und nach sind denn auch alle Einwendungen gegen die Theorie von Laplace verstummt, und Le Conte zeigte in der oben angeführten Arbeit, dass dieselbe recht gut mit der Erfahrung stimmt, wenn man nur die neuesten, genauen Werthe für die in der Rechnung vorkommenden physikalischen Constanten zu Grunde legt. In der That erhält er, indem er (nach Regnault) das specifische Gewicht des Quecksilbers in Bezug auf Luft zu 7990,044388, die Beschleunigung der Schwere (nach Baily) zu 9,80942005 m und das Verhältniss $k$ der specifischen Wärmen (nach Masson) zu 1,41 annimmt, für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles 332,43 m; ein Resultat, das mit allen in neuerer Zeit erhaltenen Beobachtungsresultaten sehr gut übereintrifft.

Die Fortpflanzung des Schalles in Flüssigkeiten, die man früher der mangelnden Elasticität derselben wegen geleugnet hatte, hielt Chladni für erwiesen. Er führt auch ausdrücklich an, dass Nollet und Musschenbroeck die Unabhängigkeit dieser Fortpflanzung von der in dem Wasser eingeschlossenen Luft erkannt und durch Versuche nachgewiesen hätten. Eine Messung dieser Fortpflanzungsgeschwindigkeit aber haben weder Chladni noch seine nächsten Nachfolger unternommen.

Die Geschwindigkeit der Fortpflanzung des Schalles durch feste Körper versuchte in den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts zuerst Wünsch zu bestimmen[2]). Er fügte 36 Latten von je 24 Fuss Länge so zusammen, dass sie die Katheten eines rechtwinkeligen Dreieckes bildeten, dessen Hypotenuse frei blieb. Wenn dann ein Gehülfe gegen das Ende der einen Kathete mit einem Hammer schlug, so hörte Wünsch am Ende der anderen durch das Holz hindurch den Schlag augenblicklich, während der Schall durch die Luft $^1/_2$ Secunde später erfolgte; er schloss daraus, dass der Schall durch feste Körper überhaupt sich momentan fortpflanze. Chladni kam 1797 auf einem ganz anderen Wege zu einem besseren Ziele[3]). Da die Longitudinalschwingungen fester Körper jedenfalls ganz in derselben Art erfolgen, wie die Longitudinalschwingungen der Luft in offenen Pfeifen, so wird für jene wie für diese die Wellenlänge des Grundtones gleich der doppelten Länge des tönenden Stabes sein. Aus der beobachteten Länge des Stabes folgt also die Wellenlänge, aus der Tonhöhe die Schwingungszahl, und das Product beider ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in dem betreffenden Stabe. Chladni erhielt so für

---

1) Phil. Mag. (4), I, 1851.

2) Gehler's physik. Wörterb. VIII, S. 493. Christian Ernst Wünsch, 1744—1828, Professor der Mathematik und Physik in Frankfurt a. d. O.

3) Ueber Longitudinalschwingungen . . . und über die Fortleitung des Schalles in festen Körpern, Voigt's Magazin für den neuesten Zustand d. Naturk. I, 1797. Auch Akustik, S. 266.

Akustik, Chladni, c. 1800.

die verschiedenen Materien folgende Verhältnisszahlen der Schallgeschwindigkeiten in ihnen und in der Luft: Zinn 7,5; Silber 9; Kupfer 12; Eisen 16,7; Glas 16,7; Eichenholz 10,7; Buchenholz 12,5; Lindenholz 15; Tannenholz 16 etc. Die Zahlen stimmen recht gut mit neueren, durch directe Beobachtungen erhaltenen Resultaten überein.

Haben wir bis jetzt Chladni nur als den glücklichsten Entdecker und unfehlbaren Experimentator bewundert, so bleiben doch auch einige Punkte zu erwähnen, an denen er zu einem durchschlagenden Erfolge nicht kommen konnte. Nach Muncke [1]) hat zuerst Bryan Higgins im Jahre 1777 das Tönen einer Wasserstoffflamme in einer Glasröhre beobachtet, aber seine Untersuchungen erst später um das Jahr 1797 in Nicholson's Journal öffentlich bekannt gemacht, nachdem ihm schon Deluc in seinen Nouvelles idées de météorologie von 1787, wie auch Hermbstaedt (Crell's chem. Ann. 1793) und Tromsdorf (Erfurter gelehrte Zeitung 1794) zuvorgekommen waren. Letzterer hielt dafür, die Ursache des Tönens sei nicht ganz zu erklären; es möge davon herrühren, dass immerwährend durch die Flamme ein Vacuum erzeugt werde, in welches die äussere Luft immer wieder hineinstürze; auch werde vielleicht das Glas durch die innere Luft erwärmt und durch die äussere abgekühlt, so dass auch die Wände der Röhre in Schwingungen versetzt würden. Graf Mussin-Puschkin meinte, der Ton werde erzeugt durch immerwährende Explosionen des Knallgases. Scherer schloss sich dieser Ansicht an, aber während Puschkin nur die Luft durch die Explosionen in Schwingungen gerathen liess, wollte Scherer die Erschütterungen des Glases als Ursache des Tönens annehmen. Chladni behauptete 1795 [2]) dass das Letztere nicht der Fall sein könne, weil das Anfassen und sogar das Umwicklen des Glases mit Tuch das Tönen nicht hindere; es werde vielmehr die Luft in der Röhre durch das Einströmen der atmosphärischen Luft von unten, gerade so in Longitudinalschwingungen versetzt, wie die Luft in einer Pfeife, und die Röhre gebe bei der Flamme denselben Ton, wie beim Einblasen. Andere als Wasserstoffflammen könnten keinen Ton erzeugen, weil dabei das Zuströmen von Gas fehle und weil die Flammen auch wohl nicht so ruhig brennten. Chladni's Autorität verschaffte dieser Hypothese für längere Zeit die Herrschaft.

Das gleiche Interesse, wie die chemische Harmonika, erregte um dieselbe Zeit eine andere schon bekannte akustische Erscheinung, das harmonische Tönen gespannter Saiten im Winde, erfuhr aber abenteuerlichere Erklärungen als jene. Nachdem schon um die Mitte des vorigen Jahrhunderts ein schottischer Componist Oswald in einem langen Kasten, der mit einem Resonnanzboden versehen war, mehrere Saiten im Gleichklang neben einander aufgespannt und von denselben

[1]) Gehler's phys. Wörterb. V, S. 99.

[2]) Neue Schriften d. Ges. d. naturf. Freunde in Berlin I, 1795. Auch Akustik, S. 91.

Akustik, Chladni, c. 1800.

im Winde „eine Mannichfaltigkeit entzückender Töne, die alle Beschreibung übertrifft“, gehört hatte, entdeckte Pater Ventan[1]), Probst zu Bürkli bei Basel, durch Zufall, dass auch eine einzige Saite mehrere Töne geben könne. Er hatte im Hofe zu irgend einem Zwecke einen langen Eisendraht ausgespannt und fand, dass dieser Eisendraht, wenn er mit der Mittagslinie parallel gezogen wurde, bei jeder Aenderung der Witterung verschiedene Töne hören lasse. War der Eisendraht von Osten nach Westen gespannt, so tönte er nicht. Messingdrähte blieben unter allen Umständen stumm. Chladni wies den hier angedeuteten Schluss zurück, dass das Tönen der Wetterharfe von einem Magnetismus der Drähte herrühren könne, und machte darauf aufmerksam, dass die Richtung der Drähte von Nord nach Süd vielmehr durch Localumstände und die Richtung der herrschenden Winde von West nach Ost bedingt werde. Doch hatte Matthew Young schon ein paar Jahrzehnte vorher eine eingehendere, genügende Erklärung des Instruments gegeben[2]). Young nahm zur Untersuchung des Instruments alle Saiten bis auf eine weg und fand, dass dieselbe auch dann noch harmonische Töne gebe.. Er bewies weiter durch seine Untersuchungen, dass der Wind die einzige Ursache der Seitenschwingungen und der mannichfaltigen Töne sei. Der Stoss des Windes treffe nämlich die Saite der Harfe selten in der Mitte, vielmehr meist an anderen Punkten, und dadurch bewirke er, dass die Saite sich mehrfach in schwingende Theile theile und ausser ihrem Grundton auch noch ihre Obertöne hören lasse. Diese Erklärung, der sich auch Chladni anschloss, fand um jene Zeit noch nicht das volle Verständniss, weil man über das Wesen der Obertöne (oder der Nebentöne, wie man sie damals nannte) noch nicht zur Klarheit gelangen konnte.

Friedr. Gottl. v. Busse war noch am Ende des 18. Jahrhunderts gar nicht geneigt, bei irgend einem Tone die Möglichkeit eines Mitklingens höherer Töne zuzugeben. Chladni[3]) meint zwar, dass man bei Saiten trotz aller Vorsicht fast immer ein schwaches Mitklingen des dritten und fünften harmonischen Tones bemerke, und glaubt auch bei Blasinstrumenten und Pfeifen, wie bei Stäben, den nächsten Oberton immer gehört zu haben. Aber er macht dem gegenüber darauf aufmerksam, dass die Töne bei Saiten wenigstens sich auch rein darstellen lassen, wenn man nur die richtigen Stellen der letzteren abdämpft. Danach wendet er sich dann entschieden gegen Diejenigen, welche behaupten, „der Ton sei wesentlich ein Akkord, nur dadurch unterscheide derselbe sich von einem blossen Klappern“; vielmehr erklärt er die Obertöne für unwesent-

[1]) Fischer, Gesch. d. Physik VI, S. 574. Die schon im 2. Bande (S. 123) dieses Werkes erwähnte Kircher'sche Aeolsharfe ist beschrieben in Gilbert's Annalen X, S. 57 bei der Uebersetzung der betreffenden Stelle des nachfolgenden Young'schen Werkes.

[2]) Matthew Young (1750 — 1800, Prof. d. Physik in Dublin, seit 1786 Bischof): An inquiry into the principal phaenomena of sounds and musical strings, London 1784.

[3]) Akustik, S. 68.

Akustik, Chladni, c. 1800.

liche und den Grundtönen nur durch Zufall sich beimischende Töne. Von diesem berechtigten Standpunkte aus wird er dann weiter getrieben. Da die Obertöne demnach nicht wesentlich und häufig auch unharmonisch sind, so müssen Rameau, Jamard, Sulzer, Erxleben u. A. durchaus Unrecht haben, wenn sie die Grundgesetze aller Harmonie aus dem Vorhandensein der Obertöne erklären wollen. Als Kennzeichen der consonirenden oder dissonirenden Intervalle bleibt damit für Chladni (wie für die mathematischen Akustiker Euler etc.) nur die mehr oder minder grosse Einfachheit des Verhältnisses ihrer Schwingungszahlen, und Chladni rühmt in der Vorrede zu seiner Akustik (S. XI) ausdrücklich, dass er das Vorurtheil beseitige, nach dem die Consonanz oder Dissonanz der Intervalle von dem Mitklingen höherer Töne herrühren solle. Leider wird ihm dadurch, dass er die Obertöne so ganz in das Walten des Zufalls setzt, auch die Möglichkeit benommen, für die verschiedenen Klangfarben der Töne irgend eine plausible Erklärung zu geben. Er bekennt vielmehr in seiner Akustik (S. 218) ausdrücklich: „So wie man überhaupt von der Natur der verschiedenen Abänderungen des Schalles noch gar nichts weiss, ebenso unbekannt ist es, wie solche mannichfaltige Modificationen des Schalles (Klangfarben) durch die Luft verbreitet werden. L. Euler . . . (Mém. Berl. 1765, auch de motu aëris in tubis) findet es wahrscheinlich, dass diese Modificationen und Articulationen auf kleinen Verschiedenheiten des Grades der Verdichtung der Lufttheile und der Geschwindigkeit, mit welcher ein jedes aus seiner Lage verrückt wird, beruhen."

Chladni's neue Musikinstrumente, das Euphonium und das Klavicylinder, deren innere Einrichtung er bis zum Jahre 1821 [1]) geheim hielt, haben trotz des Enthusiasmus, den sie anfänglich erzeugten, sich nicht in der Gunst der Musiker wie des Publikums zu halten vermocht, wahrscheinlich weil die Töne der in ihnen schwingenden hölzernen, gläsernen oder metallenen Stäbe zu geringer Stärke und zu weniger Modificationen fähig waren. Sie hatten, als sie zuerst dem grossen Akustiker die Grundbedingungen der Existenz und die Mittel zu seinen erfolgreichen wissenschaftlichen Arbeiten lieferten, ihren Zweck erfüllt und gingen mit ihm zu Grabe.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

Von alten Vorstellungen sich zu befreien und neue den gewohnten widersprechende Ideen in sich aufzunehmen, dazu bedarf es, sofern nicht directe Beobachtung das Neue unwiderleglich zeigt, für den Entdecker selbst immer einer gewissen längeren oder kürzeren Zeit. Es ist darum gar nicht so wunderbar, als es nachträglich oftmals scheint, wenn die Annahme einer Hypothese durch die Allgemeinheit selbst in dem Falle

---

[1]) Beiträge zur praktischen Akustik und zur Lehre vom Instrumentenbau, Leipzig 1821.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

auf sich warten lässt, dass diese Hypothese ein Bedürfniss und die Bestätigung durch die Beobachtung in ausreichendem Maasse gegeben ist. Auch in der geistigen Welt gilt das Gesetz der Trägheit, und wenn durch Autorität und Zeit eine Theorie geheiligt ist, dann kann dieselbe auch durch eine Autorität nur mit Hülfe der Zeit gestürzt werden. Mehr als dreien Generationen hatte nun schon die Emissionstheorie des Lichts als sichere Grundlage, als bequemer Ausgangspunkt der Rechnung gedient; der grosse Newton hatte sie gegründet, berühmte Optiker hatten sie erfolgreich benutzt, dem Anstürmen bedeutender Gegner hatte sie mehrmals siegreich Stand gehalten; sollte man nun einem neuen Angriffe gegenüber die sichere Position ohne Kampf verlassen, durfte man nicht hoffen auch diesen wie alle früheren abzuschlagen? fast schien es als sollte das letztere gelingen.

Der Vorkämpfer im Streite gegen die alte Lichttheorie, **Thomas Young**[1]), ein Landsmann Newton's, schrieb schon als junger Student der Medicin eine optische Abhandlung Observations on vision (Phil. Trans. 1793), in der er sich aber nur mit dem Process des Sehens, vor Allem der Accommodation des Auges beschäftigte. Eine zweite Abhandlung Outlines of experiments and inquiries respecting sound and light (Phil. Trans. 1800)[2]), die er nach Vollendung seiner Studien veröffentlichte, war grösstentheils akustischen Inhalts, griff aber in einem

---

[1]) Thomas Young, am 13. Juni 1773 in Milverton (Sommersetshire) geboren, studirte in London, Edinburgh und Göttingen Medicin, beschäftigte sich aber auch früh schon mit mathematischen, physikalischen, botanischen und philologischen Studien. Von 1801 bis 1804 war er Professor an der Royal Institution; nachdem er diese Stellung aufgegeben, wollte er ganz der Arzneikunde leben, was er aber niemals gehalten. Von 1811 bis zu seinem Tode war er Arzt am St. Georges Hospital in London, von 1818 auch Secretair des Board of Longitude und mit der Herausgabe des Nautical almanac beauftragt. Als Arzt wurde er für zu gelehrt gehalten, am Krankenbett war er schüchtern und schwankend. Seine wissenschaftlichen, überall werthvollen Arbeiten erstrecken sich über sehr weite Gebiete; sie betreffen die Mechanik, die Optik, die Wärmetheorie, die Akustik, die theoretische Chemie, die Bewegung des Blutes, den Schiffsbau, die mittlere Lebensdauer des Menschen, die Dichte der Erde, das wahrscheinlich richtigste Resultat aus mehreren Beobachtungen, die Ursache der Schwere, Ebbe und Fluth, die Figur der Erde, die Mondatmosphäre; für die Entzifferung der Hieroglyphenschrift hat Young wichtige Dienste geleistet. Für das Supplement der Encyclopaedia Britannica lieferte er über 60 biographische und physikalische Kapitel, für die Quarterly Review viele Recensionen. Dabei war er ein „gründlicher Kenner der Musik, ausgezeichneter Maler, geübter Reiter, der gegen Kunstreiter Wetten gewann, und feinster Gesellschafter". „Seine Fähigkeiten waren gross, seine Arbeitskraft unermüdlich, sein Wandel fleckenlos, sein Glaube orthodox aber duldsam." Wegen seiner Leitung des Nautical almanac wurde er in der heftigsten, ungerechtesten Weise angegriffen, ohne dass er genügenden Schutz gefunden hätte. Dies beförderte den Verfall seiner Gesundheit. Er starb am 10. Mai 1829 in London.

[2]) Wieder abgedruckt in A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts, London 1807, II.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

ihrer sechzehn Kapitel auch auf die Optik zurück. Dieses Kapitel, das zehnte der ganzen Abhandlung, trägt die Ueberschrift Of the Analogy between Light and Sound [1]). Es hebt zwei schwache Seiten der Emissionstheorie des Lichts hervor. „Alle Lichtstrahlen, mögen sie nun herrühren vom schwächsten elektrischen Funken, von der Reibung zweier Kiesel, vom geringsten Grade sichtbaren Glühens, von der Weissgluth eines Ofens oder gar von der Sonne, werden mit gleicher Geschwindigkeit im Raume fortgepflanzt; welchen Grund könnte die Emissionstheorie dafür angeben, dass alle diese verschiedenen Lichtquellen die leuchtenden Theilchen mit gleicher Geschwindigkeit von sich auswerfen.“ Und wie soll man nach dieser Hypothese erklären, dass von den Lichtstrahlen, welche nach jeder Hinsicht von gleicher Beschaffenheit sind, beim Auftreffen auf ein anderes, durchsichtigeres Medium immer ein Theil reflectirt wird, während ein anderer in dasselbe eintritt? Die Undulationstheorie des Lichtes aber lässt beide Erscheinungen leicht aus der überall in einem Medium gleichen und in verschiedenen Medien verschiedenen Dichtigkeit des Aethers ableiten. Freilich bleibt für diese letztere Theorie wieder die Farbenzerstreuung bei der Brechung des Lichtes ein böser Punkt, der aber bei einer besseren Ausbildung der Mechanik der elastischen Flüssigkeiten wohl überwunden werden kann. Jedenfalls sind die ausgezeichneten Experimente des Grafen Rumford, welche die moderne Wärmetheorie so erschüttert haben, der letzteren Theorie günstiger als der ersteren.

Das folgende elfte Kapitel der Schrift mit der Ueberschrift Of the coalescence of musical Sounds [2]) (Von dem Zusammenklang musikalischer Töne) ist, trotzdem es sich gar nicht auf das Licht bezieht, doch für die Theorie desselben noch wichtiger geworden als das vorige. Young's epochemachende Entdeckung, welche ihn aus einem Bekämpfer zu einem Reformator der Theorie der Optik werden liess, war die der Interferenz von Wellenbewegungen. Das Wort selbst stammt von ihm, und auch die Erscheinung ist durch Young ganz im Allgemeinen zum erstenmal klar behauptet und auseinander gesetzt worden. Bei den sichtbaren Wellen des Wassers hatte man wohl die Ausgleichung von Bergen und Thälern bemerkt, sobald man nur diese Bewegung überhaupt beobachtet hatte, aber jedenfalls legte man darauf keinen Werth und behandelte diese Thatsache nicht weiter. s'Gravesande z. B. giebt in seinem grossen Werke Physices elementa mathematicae (§. 1748) über das Zusammentreffen verschiedener Wellensysteme nichts weiter als den Satz: „Die Bewegungen verschiedener Wellen stören einander nicht, wenn diese Bewegungen verschiedenen Richtungen folgen“. Young aber behandelte die Durchkreuzung von Wellensystemen als ein für physikalische Disciplinen

[1]) Lectures II, 541 bis 543.

[2]) Ibid. II, S. 544 bis 545.

wichtiges Hauptproblem und erntete mit diesen Untersuchungen die wunderbarsten Früchte. Er wendet sich in dem erwähnten Kapitel vor Allem gegen Smith[1]), der angenommen hatte, dass die Vibrationen verschiedener Töne ganz unabhängig von einander bleiben könnten, und zeigt im Gegentheil, wie die gleichzeitigen Tonwellen in den einzelnen Punkten des Raumes sich summiren und subtrahiren müssen. Durch eine graphische Addition stellt er auch die Schwingungen, welche durch Einwirkung verschiedener Wellen in einem Punkte entstehen, für verschiedene Fälle anschaulich dar und führt auf diese Summation der Schwingungen die Schwebungen und Combinationstöne zurück. Weitere Anwendung dieser Versuche auf die Optik findet man in jener Schrift nicht mehr. Dass aber diese Ideen es waren, welche Young erst zur Sicherheit in Bezug auf seine optischen Anschauungen führten, ersieht man aus einem in Nicholson's Journal (August 1801) veröffentlichten Briefe. In diesem rechtfertigte er seine Aeusserungen über Dr. Smith's Harmonics gegenüber den tadelnden Bemerkungen, welche Dr. Robison in der Encyclopaedia Britannica veröffentlicht hatte. Von seinen Untersuchungen über das Zusammentreffen der Tonwellen sagte er dann: „aber wenn sie für Niemand sonst von Nutzen wären, so würde ich doch meine Mühe nicht für verloren ansehen. Denn ich schmeichle mir, dass die Folgerungen in Bezug auf die Theorie der Farben, zu denen sie mich geführt haben, ein neues Licht auf die interessantesten Theile der Optik werfen werden[2])“.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

Diese Folgerungen theilt Young noch in demselben Jahre, am 12. November 1801, der Royal Society mit, und die dabei verlesene Abhandlung On the Theorie of light and colours findet sich in den Phil. Trans. für 1802 zuerst abgedruckt[3]). Er sagt sich darin nun gänzlich von der Emissionstheorie los: „Eine weitere Untersuchung der Farben dünner Blättchen, wie sie im zweiten Buche der Optik Newton's beschrieben sind, hat die Vorliebe, die ich bereits früher für die Undulationstheorie des Lichtes hegte, in eine tiefe Ueberzeugung von ihrer Wahrheit und von ihrer kräftigen Wirksamkeit verwandelt, eine Ueberzeugung, die seitdem durch meine Analyse der Farben feingestreifter Körper ungemein bestätigt worden ist“. Diese Farben sind eben ohne künstliche Hypothesen nur aus Durchkreuzungen von Wellensystemen erklärbar. In Proposition VIII. beschreibt Young diese ähnlich wie früher: „Wenn zwei Wellenzüge von verschiedenem Ursprunge entweder vollkommen oder doch nahezu in ihrer Richtung

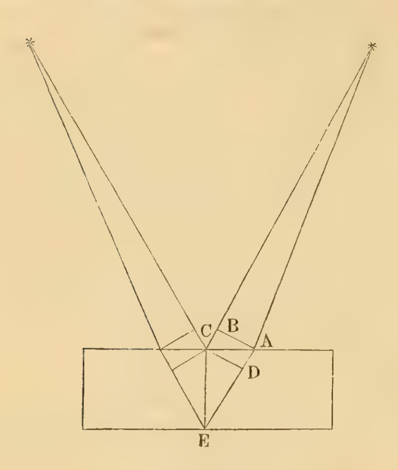
[1]) Robert Smith (der berühmte Optiker): Harmonics or the philosophy of musical sounds; 3 Auflagen von 1749 bis 1762.

[2]) Lectures II, 608 bis 609.

[3]) Uebersetzt in Gilbert's Ann. XXXIX, S. 156, 1811. Auch abgedruckt in Lectures II, p. 611 bis 632.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

übereinstimmen, so ist die aus ihrer Verbindung hervorgehende Bewegung eine Combination der jeder einzelnen Undulation zukommenden Bewegungen". Speciell fügt er dann noch hinzu, dass die resultirenden Bewegungen am stärksten werden müssen, wenn die Wellen in ihrer Phase vollkommen gleich sind, und am schwächsten, wenn die grösste directe Bewegung der einen Welle mit der grössten retrograden Bewegung der anderen Welle zusammentrifft, und dass im letzteren Falle die Bewegung gänzlich aufgehoben werden muss, sowie die beiden Undulationen von gleicher Intensität sind. Denken wir uns nun zwei von derselben Lichtquelle ausgehende Strahlen neben einander auf eine durchsichtige Platte fallend, von denen aber der eine an der vorderen und der andere an der hinteren Seite der Platte reflectirt wird, so werden dieselben nach der Reflexion wieder nahezu zusammenlaufen und auf der Netzhaut sich treffen, nur wird dabei der an der hinteren Seite der Platte reflectirte Strahl ungefähr um die doppelte Dicke der Platte verzögert sein. Die Lichtstrahlen werden also im Allgemeinen nicht mehr in demselben Schwingungszustande oder in derselben Phase zusammentreffen und werden sich darum in ihrer Wirkung auf die Netzhaut ebenso leicht verstärken als auch schwächen können. Wenn die doppelte Dicke der Platte gerade eine Wellenlänge oder ein Vielfaches einer solchen beträgt, so werden sich die Strahlen in ihrer Wirkung einfach addiren, und wenn die Dicke einer halben Wellenlänge gleich ist, so werden sie sich aufheben. Die von Newton beobachteten Farbenringe, die man durch Auflegen einer Linse auf eine ebene Platte erhält, erklären sich also durch das Zusammentreffen zweier je nach der Grösse des Zwischenraumes zwischen Linse und Platte mehr oder weniger in ihrer Phase differirenden Lichtstrahlen. Da an den Stellen, wo die Lichtmaxima oder -minima liegen, die Dicke der Zwischenschicht ein gerades oder ungerades Vielfaches des vierten Theiles der Wellenlänge sein muss, so lässt sich aus den von Newton gemessenen Dicken der Zwischenschicht[1]) leicht die Wellenlänge des Lichtes berechnen. Young stellte auf diese Weise die folgende Tabelle her:




---

[1]) Siehe Bd. II dieses Werkes, S. 194.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

| Farben | Wellenlänge in Zollen | Zahl der Schwingungen in 1 Zoll | Zahl der Schwingungen in 1 Sec. |
|---|---|---|---|
| Aeusserstes Ende des Roth . . . . . | 0,0000 266 | 37 640 | 463 Billionen |
| Roth . . . . . . . . . . . . . . . | 256 | 39 180 | 482 „ |
| Mittel . . . . . . . . . . . . . . . | 246 | 40 720 | 501 „ |
| Orange . . . . . . . . . . . . . . | 240 | 41 610 | 512 „ |
| Mittel . . . . . . . . . . . . . . . | 235 | 42 510 | 523 „ |
| Gelb . . . . . . . . . . . . . . . | 227 | 44 000 | 542 „ |
| Mittel . . . . . . . . . . . . . . | 219 | 45 600 | 561 „ |
| Grün . . . . . . . . . . . . . . . | 211 | 47 460 | 584 „ |
| Mittel . . . . . . . . . . . . . . . | 203 | 49 320 | 607 „ |
| Blau . . . . . . . . . . . . . . . | 196 | 51 110 | 629 „ |
| Mittel . . . . . . . . . . . . . . . | 189 | 52 910 | 652 „ |
| Indigo . . . . . . . . . . . . . . . | 185 | 54 070 | 665 „ |
| Mittel . . . . . . . . . . . . . . . | 181 | 55 240 | 680 „ |
| Violett . . . . . . . . . . . . . . | 174 | 57 490 | 707 „ |
| Aeusserstes Ende des Violett . . . . | 167 | 59 750 | 735 „ |
| Weiss . . . . . . . . . . . . . . . | 225 | 44 440 | 545 „ [1] |

Wie die Farben dünner Blättchen erklärt Young auch die Farben, welche auf feingestreiften Platten, z. B. auf Mikrometern, bemerkt werden, durch das Zusammentreffen zweier Lichtstrahlen und zwar derjenigen, welche von den beiden Seiten jeder in das Glas eingeritzten Mikrometerlinie reflectirt werden. Die Beugungsfarben, welche von dem Licht einer schmalen Spalte auf einem Schirm erzeugt werden, leitet Young hier schon aus dem Zusammentreffen des direct durchgelassenen und des von der Kante der Oeffnung reflectirten Lichtes ab, geht hier aber noch nicht näher auf diese Erscheinungen ein.

Young hat in dieser Abhandlung für die Sache den Namen Interferenz noch nicht. Das Zeitwort interfere gebraucht er von den Lichtstrahlen erst in einer Abhandlung vom nächsten Jahre An account of some cases of the production of colours not hitherto described (Phil. Trans. 1802, gelesen vor der Roy. Soc. am 1. Juli 1802); das Substantiv Interference folgt erst wieder nach einem Jahre in der letzten der fundamentalen Abhandlungen auf diesem Gebiete, die den Titel führt Experiments and calculations relative to physical optics (Phil. Trans. 1804; gelesen vor der Roy. Soc. am 24. Nov. 1803). In der ersteren Abhandlung kommt er ausführlicher auf die Beugungs-

[1] Lectures II, 627.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

erscheinungen zurück. Er spannt jetzt in den Weg der Lichtstrahlen, die von einem schmalen erleuchteten Spalt kommen, Haare, Seidenfäden, Wollfasern etc. aus und beobachtet, wie das schon früher ähnlich geschehen, Farbenstreifen zu beiden Seiten des Schattens, aber auch Farbenstreifen im Schatten dieses Haares etc. selbst. Die ersteren erklärt er wie früher durch die Interferenz des directen und des an den Rändern des Körpers reflectirten Lichtes, die zweiten aber durch die Interferenz des an den beiden Seiten des schattenwerfenden Körpers vorübergehenden gebeugten Lichtes [1]). Dem entsprechend zeigte die Mitte des Schattens eine weisse Linie, auf welche die farbigen Linien nach aussen in Abständen entsprechend der Wegdifferenz der von beiden Seiten kommenden Lichtstrahlen folgten. Nach einer ähnlichen Erklärung der Farben von mixed plates, d. h. der Farben, welche man erhält durch Einschliessen zweier nicht mischbarer Flüssigkeiten, wie Wasser und Oel zwischen eine ebene Glasplatte und eine Glaslinse, folgt dann eine sehr wichtige Verbesserung seiner Theorie der Farben dünner Blättchen. Nach dieser Theorie, gemäss welcher die Farben durch Interferenz des an den beiden Flächen der Blättchen reflectirten Lichtes entstehen, müsste das Licht einer unendlich dünnen Platte im reflectirten Lichte weiss sein, weil ja in diesem Falle eine Wegdifferenz der beiden Strahlen und damit eine Phasendifferenz ihrer Undulationen nicht stattfindet. Dem gänzlich entgegen zeigt sich aber an der Berührungsstelle einer Glaslinse und einer Glasplatte ein schwarzer Fleck. Young nahm deswegen an, dass bei der Reflexion an einer der Flächen die Undulation um eine halbe Wellenlänge verzögert, die Bewegung der Undulationen also in ihrer Richtung umgekehrt werde und so auch ohne Wegdifferenz mit dem anderen Strahl sich auslösche. Der Analogie mit dem Stosse elastischer Körper nach schloss er, dass diese Umkehrung der Richtung beim Auftreffen auf ein optisch dichteres Medium geschehe, also, wenn das dünne Blättchen aus Luft zwischen Glasflächen besteht, an der hinteren Fläche. Er hatte auch die Genugthuung, dass diese Theorie sich durch andere Versuche bestätigte. Wenn er zwischen eine Crownglaslinse und eine Flintglasplatte einen Tropfen Sassafrasöl brachte, dessen optische Dichte zwischen der der beiden Gläser liegt, so wurde der Mittelfleck weiss, und auch die Complementärfarben der Blättchen im durchgehenden Lichte stimmten nun vollständig mit seinen Hypothesen.

In der Abhandlung vom Jahre 1804 kommt Young zunächst nochmals auf die Beugungserscheinungen zurück [2]). Er misst bei verschiedenen Versuchen die Breiten der farbigen Streifen und findet, dass die daraus abgeleiteten Intervalle der Anwandlungen zur Verstärkung

---

[1]) Lectures II, S. 633 bis 635. Die betr. Abhandl. auch in Gilb. Ann. XXXIX, S. 206.

[2]) Ibid. II, S. 637 bis 648. Auch in Gilb. Ann. XXXIX, S. 262.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

oder Auslöschung des Lichtes sehr nahe übereinstimmen mit denjenigen, die aus den Farbenringen dünner Blättchen folgten, und dass danach allein schon beide Erscheinungen einer und derselben Ursache, der Interferenz des Lichtes, zugeschrieben werden müssen. Durch die Interferenz des Lichtes erklärt Young weiter die sogenannten überzähligen Bogen, welche an der Innenseite des Haupt- und an der äusseren Seite des Nebenregenbogens zuweilen wahrgenommen werden. Schliesslich versucht er sein Interferenzprincip auf die dunklen Lichtstrahlen, die chemischen, welche Ritter und Wollaston zuerst behandelt, und die Wärmestrahlen, welche Herschel untersucht hat, auszudehnen. In Bezug auf die chemischen Strahlen gelingt ihm das, indem er die Newton'schen Farbenringe nicht direct betrachtet, sondern auf ein mit Silbernitrat getränktes Papier projicirt. Er findet dann drei deutlich sichtbare dunkle Ringe, deren Dimensionen ihm die Analogie der sichtbaren und unsichtbaren Strahlen bestätigen. Für die dunklen Wärmestrahlen kann er Mangels eines genügend empfindlichen Thermometers ähnliche Erscheinungen nicht entdecken [1]).

Alle seine Einwände gegen die Emissionstheorie und alle seine Erfolge für die Undulationstheorie fasst dann Young in der 39. Vorlesung seiner Lectures of natural philosophy noch einmal übersichtlich zusammen und hebt noch einmal die Wichtigkeit seiner Entdeckung, der Interferenz des Lichtes, für die Verbindung so unähnlicher Erscheinungen wie der Beugungsfarben und der Farben dünner Blättchen etc. hervor. Er hält dafür, dass nur von diesem Princip aus ein Fortschritt der Optik möglich ist, aber giebt dabei doch zu, dass nur durch die Zeit und weitere Erfahrungen seine Theorie die volle Bestätigung oder auch eine entscheidende Zurückweisung erfahren könnte.

Young hatte alle Ursache, auf die Zukunft zu hoffen; denn in der Gegenwart liess die Aufnahme seiner Arbeiten nicht viel weniger als Alles zu wünschen übrig. Henry Brougham schrieb in der angesehenen Edinburgh Review vom Jahre 1803 sehr ungünstig über die Young'schen Arbeiten. Er konnte in denselben absolut Nichts, was den Namen einer Entdeckung, ja nur eines wissenschaftlichen Experiments verdiente, finden, und er konnte seinen Bericht überhaupt nicht schliessen „ohne die Aufmerksamkeit der Royal Society darauf zu lenken, dass sie in den letzten Zeiten so viele flüchtige und inhaltsleere Aufsätze in ihre Schriften aufgenommen habe". William Hyde Wollaston hatte in einer Abhandlung [2]), die am 24. Juni 1802 in der Royal Soc. gelesen wurde, bemerkt, dass die Huyghen'schen Constructionen der

[1]) In den letzten beiden Abhandlungen deutet Young auch die Theorie der Farbenempfindung an, die von Helmholtz in neuerer Zeit so erfolgreich ausgebildet worden ist. (Gilb. Ann. XXXIX, S. 164 u. 217.)

[2]) On the oblique refraction of Iceland cristal; Phil. Trans. for 1802. Im Auszug Gilbert's Ann. XXXI, 1809, S. 252 bis 262.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

Doppelbrechung im Kalkspath viel genauer seien, als die Newton'schen, dass überhaupt die von Young wieder mit Erfolg angewandte Huyghen'-sche Undulationstheorie in ihren Folgerungen so viel Uebereinstimmung mit den Resultaten der Versuche zeige, dass sie jedenfalls verdiene, in genauere Ueberlegung gezogen und allgemeiner angenommen zu werden. Brougham kann sich natürlich auch hiermit nicht befreunden und ist recht unzufrieden, „zu sehen, dass ein so genauer und scharfsinniger Experimentator die seltsame Undulationstheorie angenommen hat [1]". Wirklich schienen die harten Worte des 24 jährigen Kritikers von der Allgemeinheit gebilligt zu werden. Die englischen Gelehrten gingen über die Arbeiten Young's ohne weitere Discussion zur Tagesordnung über (Wollaston selbst hat später noch eine neutrale Stellung zwischen den beiden Theorien zu halten versucht); die Deutschen übersetzten die Abhandlungen Young's, ohne Gebrauch davon zu machen, und die Franzosen scheinen sie gar nicht oder doch nur ganz unvollkommen kennen gelernt zu haben [2]. Young selbst schrieb später diesen Misserfolg seiner, von der gewöhnlichen so abweichenden, Darstellungsweise zu. In der That ist dieselbe mehr kurz als bequem für das Verständniss, in ihrer Gliederung schwer übersichtlich und in der Beschreibung der Experimente, wie in der mathematischen Ableitung der Resultate ungewöhnlich. Indessen glaube ich doch, dass dies nur eine Nebenursache des schlechten Erfolges war, die Hauptursachen lagen in dem schon erwähnten Trägheitsmoment, das jeder alten Theorie innewohnt, und endlich nicht zum mindesten auch in der Young'schen Theorie selbst. Die Erklärung der Farben durch Interferenz nur zweier Lichtstrahlen war nicht sehr wahrscheinlich, und wie sich später zeigte, auch in ihren Folgerungen nicht ganz genau; der Verlust einer halben Wellenlänge bei der Reflexion an einem dichteren Medium schien keine bessere Hypothese als die der Newton'schen Anwandlungen, und endlich war die Theorie Young's gänzlich ungeeignet zur Erklärung der Polarisationserscheinungen, die eben jetzt durch neue Entdeckungen wieder in den Vordergrund traten. Dem gegenüber konnte selbst die unleugbare Fruchtbarkeit des Interferenzprincips, auch wenn man dasselbe wirklich annahm, noch nicht den Ausschlag geben für die Undulationstheorie. Young selbst ver-

[1]) Henry Brougham (1778—1868, Advocat und Staatsmann, 1810 Mitglied des Unterhauses, 1830 Lordkanzler von England) hatte einige Jahre vorher eine optische Abhandlung, die rein experimentell und ganz im Newton'schen Sinne gehalten war, veröffentlicht.

[2]) Als Gay-Lussac und Arago im Jahre 1816 Young in London besuchten, rühmten sie Fresnel's Entdeckung des „krummlinigen Ganges der Beugungsstreifen" und wollten die Ansprüche, welche Young ihnen gegenüber auf die Priorität erhob, erst nicht anerkennen. Die Gemahlin des letzteren half ihm zum Siege, indem sie stillschweigend die Lectures on natural philosophy holte und die beweisende Stelle in dem Buche aufzeigte. (Arago's sämmtliche Werke, Leipzig 1854, I, S. 231 bis 232).

lor mit dem erstaunlich schnellen Auftreten immer neuer Entdeckungen auf dem Gebiete der Optik mehr und mehr den zuversichtlichen Glauben an die einzige Berechtigung der Undulationshypothese und schien nach vergeblichen Versuchen, die Erscheinungen der Polarisation mit seiner Theorie in Einklang zu bringen, bereit, sein System aufzugeben[1]). Der endliche Sieg der Emissionstheorie war danach, trotz der stets wachsenden Complicirtheit und Zahl der Hypothesen, welche die Entdeckung jedes neuen Phänomens nöthig machte, näher in Aussicht als je vorher.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

Am 4. Januar 1808 stellte die Pariser Akademie die Preisaufgabe: Aufstellung einer mathematischen und durch die Erfahrung bestätigten Theorie der doppelten Brechung, welche das Licht beim Durchgange durch verschiedene krystallisirte Substanzen erleidet. Malus[2]) beschäftigte sich lebhaft mit der Lösung dieser Aufgabe und kam dabei in kürzerer Zeit zu epochemachenden Entdeckungen. Eines Abends, als er zufällig durch einen Kalkspathkrystall den Reflex der untergehenden Sonne an den Fensterscheiben des seiner Wohnung gegenüber gelegenen Palastes Luxembourg betrachtete, gewahrte er, dass der Krystall statt der gewöhnlichen zwei Bilder nur ein Sonnenbild zeigte. Da die Nacht bald eintrat, setzte er die Versuche bei Kerzenlicht, das er von Wasser oder von einem Glasspiegel reflectiren liess, fort[3]). Auch hier sah er unter gewissen Umständen durch den Kalkspath nur ein Bild der Kerze; oder, wenn er zwei Bilder sah, so waren diese nicht, wie in directem Licht, von gleicher, sondern von ungleicher Intensität und änderten beim Drehen des Krystalls ihre Intensität so, dass ein Maximum der Lichtstärke des einen immer mit einem Minimum der Lichtstärke des anderen zusammenfiel. Danach nahm er Veranlassung, das von den glatten Oberflächen der verschiedensten durchsichtigen Körper reflectirte Licht mit Hülfe eines Doppelspaths genau zu untersuchen. Dabei fand er nicht nur, dass alle diese Körper

---

[1]) Wellentheorie des Lichtes von É. Verdet. Deutsch von R. Exner, Braunschweig 1881, I, S. 24.

[2]) Étienne Louis Malus, geboren am 23. Juli 1775 in Paris, auf der polytechnischen Schule gebildet, wurde im Jahre 1796 Capitän im Geniecorps. Als Theilnehmer der Expedition in Aegypten wurde er von der Pest befallen, 1801 ging er nach Frankreich zurück. 1806 bis 1808 war er Unterdirector der Fortificationen in Strassburg, 1809 kam er wieder nach Paris und wurde dann Examinator an der polytechnischen Schule. Er starb an der Schwindsucht am 23. Februar 1812 in Paris. Im Jahre 1801 hatte er sich mit der Tochter des Prof. Koch in Giessen, die er 1797 dort kennen gelernt, verheirathet. Die wissenschaftlichen Arbeiten von Malus beziehen sich nur auf die Optik, aber „sein Name wird der spätesten Nachwelt überliefert werden durch eine jener grossartigen Entdeckungen, welche unabhängig von ihrem eigenen Verdienste den Forschungen der Wissenschaft ein weiteres Feld geöffnet haben".

[3]) Arago's sämmtliche Werke, Leipzig 1855, III, S. 114.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

dem Licht dieselbe merkwürdige Eigenschaft ertheilten, sondern dass auch diese Eigenschaften stärker oder schwächer hervortraten, je nachdem der Reflexionswinkel grösser oder kleiner, und dass bei einem gewissen Winkel der Reflexion, der für jede besondere Materie auch ein anderer war [1]), die Lichtminima der Bilder fast bis zu vollständiger Dunkelheit geschwächt wurden. Die Erscheinungen glichen dann vollständig denjenigen, welche man bemerkte, wenn man durch zwei übereinander gelegte Kalkspathkrystalle einen leuchtenden Punkt betrachtete und dann den einen der Krystalle drehte, nur dass man im letzteren Falle vier Bilder statt der zwei bei der Reflexion entstehenden bemerkte. Newton hatte bei der Besprechung dieser Erscheinung vermuthet, der Lichtstrahl möge wohl nach verschiedenen Seiten hin verschiedene Eigenschaften besitzen. Malus nahm diese Vorstellung, die ja nur das Thatsächliche enthielt, wieder auf, und unter dem Einfluss der damals alle Physiker erregenden elektrischen und elektrochemischen Entdeckungen betrachtete er diese Seiten des Lichtstrahles als Pole, nannte die Strahlen, welche solche Seiten zeigen, polarisirt und bezeichnete die ganze Erscheinung als die Polarisation des Lichtes. Ausdrücke, die trotz ihrer zweifelhaften Berechtigung doch bald allgemein angenommen wurden.

Malus hatte die Polarität eines Lichtstrahles zuerst durch einen Kalkspathkrystall erkannt, fand aber bald, dass dies ebenso auch durch Spiegel geschehen könne. Er liess zu dem Zwecke die von einem Spiegel vollständig polarisirten Lichtstrahlen auf eine zweite spiegelnde Fläche fallen, die mit dem Lichtstrahl denselben Winkel, wie die erste Fläche bildete, und drehte diese zweite Fläche um diesen Lichtstrahl als Achse, aber mit Beibehaltung derselben Neigung. Dann wurde der Lichtstrahl, wenn die beiden spiegelnden Ebenen parallel waren, vollständig reflectirt, wenn die beiden Ebenen aber senkrecht zu einander standen, vollständig durchgelassen. Malus benutzte gerade diese Erscheinung zur Definition der Polarisation. „Ich nenne so (polarisirt) einen Lichtstrahl, der bei gleichem Einfallswinkel auf einen durchsichtigen Körper die Eigenschaft hat, entweder zurückgeworfen zu werden, oder sich der Zurückwerfung zu entziehen, je nachdem er dem Körper eine andere Seite zuwendet; und es stehen diese Seiten oder Pole des Lichtstrahls stets auf einander unter rechten Winkeln [2]).“ Der von einer durchsichtigen Fläche vollständig polarisirt zurückgeworfene Lichtstrahl heisst „in Beziehung (par rapport) auf die Einfallsebene“

---

[1]) Malus konnte für die Grösse dieses Winkels (des Polarisationswinkels) kein besonderes Gesetz und vor Allem keinen Zusammenhang desselben mit den Brechungsexponenten der Substanzen, wie er doch wahrscheinlich war, finden. Erst Brewster leitete (Phil. Trans. 1815) aus Messungen an 18 Substanzen ab, dass der Brechungsexponent gleich der Tangente des Polarisationswinkels ist.

[2]) Gilbert's Ann. XL, S. 119 bis 120.

polarisirt. Danach zeigte Malus immer deutlicher, dass diese Modification der Lichtstrahlen, welche durch Reflexion oder Doppelbrechung hervorgerufen wird, ganz dieselbe ist und also eine allgemeine Eigenschaft des Lichtstrahles darstellt. Die beiden, durch einen Doppelspathkrystall erzeugten Lichtstrahlen zeigten gegen eine reflectirte Glasplatte, wenn sie auf dieselbe unter dem Polarisationswinkel auffielen, ganz dasselbe Verhalten, wie die durch Reflexion polarisirten Strahlen. Fiel der Hauptschnitt des Krystalles mit der Einfallsebene des Spiegels zusammen, so wurde der ordentliche Strahl vollständig reflectirt, der ausserordentliche gar nicht; wurde aber der Spiegel mit Beibehaltung seiner Neigung gegen den Lichtstrahl um 90° gedreht, so kehrte sich das Verhältniss um. Der ordentliche Strahl war also in der Achse des Hauptschnittes, der ausserordentliche Strahl in einer dazu senkrechten Ebene, oder wie Malus sich ausdrückt, sie waren auf entgegengesetzte Art (en sens contraire) polarisirt.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

Die erste Nachricht von der Polarisation des Lichtes durch Reflexion theilte Malus in einer Abhandlung Sur une propriété de la lumière réfléchie par les corps diaphanes[1]) schon am 12. December 1808 dem Institute von Frankreich mit. Die vollständige Abhandlung Théorie de la double réfraction de la lumière dans les substances cristallines[2]), welche im Jahre 1810 von dem Institute gekrönt wurde, enthält das nach Malus benannte Gesetz: Wenn die Polarisationsebene des auf einen Kalkspath fallenden Lichtstrahles mit dem Hauptschnittte einen Winkel von $\alpha^0$ bildet, so ist die Intensität des ordentlich gebrochenen Strahles gleich dem Producte aus der Intensität des auffallenden Strahles in das Quadrat des Cosinus von $\alpha$ und die Intensität des ausserordentlichen Strahles gleich dem Producte aus der Intensität des einfallenden Lichtes in das Quadrat des Sinus von $\alpha$. Ausserdem giebt sie die Beobachtungen und Messungen der Doppelbrechung an vielen anderen Substanzen, als den bekannten Kalkspath und Bergkrystall, wie an Aragonit, Baryt, Strontian, Zirkon etc. Schliesslich wird gezeigt, dass bei aller Doppelbrechung dieselbe Polarisation des Lichtes eintritt, so dass man bei den Polarisationsversuchen mit demselben Erfolge wie Kalkspath auch andere doppelbrechende Substanzen anwenden, ja dass man selbst das durch einen Krystall polarisirte Licht durch einen Krystall von anderem Stoffe analysiren kann.

---

[1]) Bull. Soc. philomath. I, Nr. 16, 1809. Ausführlicher in Mémoires d'Arcueil II, 1809. Uebersetzt in Gilbert's Annalen XXXI, S. 286.

[2]) Mém. Sav. étrang. II, 1811. Am 22. März 1811 schrieb Thomas Young an Malus, dass die Royal Society ihm für dieses Werk die von Rumford gestiftete Medaille zuerkannt habe. Der Brief enthielt auch das Zugeständniss und die Verwahrung: „Ihre Versuche zeigen das Ungenügende einer Theorie (der Theorie der Interferenzen), die ich aufgestellt habe, aber sie beweisen nicht deren Unrichtigkeit". (Arago's sämmtl. Werke III, S. 117.)

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

Die Polarisation des Lichtes bei der einfachen Brechung entdeckte Malus etwas später und gleichzeitig mit Biot; die Abhandlungen beider wurden am 11. März 1811 im Institute von Frankreich gelesen [1]). Malus fand jedoch früher als Biot die Gesetze, dass das gebrochene Licht dem reflectirten immer entgegengesetzt polarisirt wird, dass die beiden entgegengesetzt polarisirenden Lichtstrahlen an Intensität immer gleich sind und dass bei einfachen Glasplatten ein grosser Theil des Lichtes unpolarisirt durch die Platte hindurchgeht. In der bald darauf folgenden Abhandlung Sur les phénomènes qui accompagnent la réflexion et la réfraction de la lumière [2]) giebt Malus die Mittel an, um das Verhältniss des durchgehenden unpolarisirten Lichtes zum polarisirten zu bestimmen, und kommt dann auf die Metallreflexion. Er findet den einzigen Unterschied zwischen der gewöhnlichen und der Metallreflexion darin, „dass die durchsichtigen Körper alles Licht, welches sie in der einen Richtung polarisiren, durch sich hindurchlassen und brechen und das in der anderen Richtung polarisirte Licht zurückwerfen, dass dagegen die Metalle das durch sie in der einen und der anderen Richtung polarisirte Licht beides zurückwerfen“.

Eine letzte Abhandlung von Malus endlich, Sur l'axe de réfraction des cristaux et des substances organisées [3]), giebt die Methode an, nach welcher man mit Hülfe der Polarisation des Lichtes die Richtung der Achse in krystallisirten Stoffen finden kann. Malus bringt die zu untersuchende Substanz zwischen einen polarisirenden und einen analysirenden Apparat (meist unbelegte Glasplatten), sieht nach, ob die Substanz überhaupt das Licht beim Durchgange ändert und in welchen Lagen derselben die Veränderungen maxima oder minima werden. Diese Lagen bestimmen die Lage des Hauptschnittes, und aus zwei solchen folgt dann die Richtung der Achse. Als Resultat einer solchen Untersuchung aller durchsichtigen Mineralien und aller krystallisirbaren chemischen Präparate giebt Malus an, dass alle diese Körper mit doppelter Strahlenbrechung begabt sind, „diejenigen allein ausgenommen, welche in Würfeln oder regelmässigen Octaëdern krystallisiren“. Diese Bemerkung sei, bemerkt er dabei, für die Bestimmung der Krystallgestalt sehr nützlich. Da das Eis z. B. eine Krystallisationsachse habe, so könne die Krystallgestalt desselben kein regelmässiges Octaëder sein, wie man vermuthet hätte. Ueberraschend sei indess, dass auch alle organisirten, vegetabilischen und thierischen Körper die Eigenschaft der Krystalle von doppelter Strahlenbrechung zeigten.

---

[1]) Biot, Lehrbuch der Experimentalphysik IV, S. 116. Die Abhandlung von Malus ist übersetzt in Gilbert's Annalen XXXVIII, S. 228.

[2]) Bull. Soc. philomath. II, no. 47, 1811. Uebersetzt in Gilbert's Annalen XL, S. 119.

[3]) Journ. de phys. LXXIII, 1811. Uebersetzt in Gilbert's Annalen XL, S. 132.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

Malus ist überzeugt, und das mit vollem Rechte, alle Methoden angegeben zu haben, welche zu einer richtigen Beschreibung und Messung der Polarisationserscheinungen dienlich sind. In Bezug auf die Theorie derselben ist er dagegen, wenigstens in den letzten Abhandlungen, gänzlich zurückhaltend. Was er giebt, sind reine Beobachtungsresultate, und seine Gesetze sind stets rein inductiv gefunden; selbst in der Beschreibung seiner Beobachtungen vermeidet er jeden Ausdruck, der auch nur eine hypothetische Färbung haben könnte. In den Abhandlungen, die seiner Schrift über die Doppelbrechung vorangehen, zeigte er sich als einen festen Anhänger der Emanationstheorie, und auch in den ersten folgenden Zeiten bekannte er sich noch zu dieser Ansicht. Vielleicht sah er später doch das Ungenügende der bestehenden Theorie ein, ohne es noch für möglich oder auch nur für nützlich zu halten, eine neue theoretische Grundlage zu geben. Darauf deuten wenigstens die Worte aus der vorletzten Abhandlung hin: „Endlich führen uns diese neuen Erscheinungen der Wahrheit um einen Schritt näher, indem sie das Unzureichende aller Hypothesen darthun, welche die Physiker ersonnen haben, um die Zurückwerfung des Lichtes zu erklären. So z. B. lässt sich in keiner dieser Hypothesen erklären, warum der intensivste Lichtstrahl, wenn er polarisirt ist, unter einer gewissen Neigung ganz durch einen Körper hindurchgehen und sich der partiellen Zurückwerfung, welche das gewöhnliche Licht erleidet, ganz entziehen könne [1]".

In der That waren die Erscheinungen der Doppelbrechung und der Polarisation des Lichtes böse Räthsel für jede Lichttheorie. Huyghens hatte die Doppelbrechung durch Bildung zweier Wellen, einer kreisförmigen und einer ellipsoidischen, erklärt. Young [2] gab als Grund dieser Bildung die ungleiche Elasticität des Aethers in den Krystallen nach den verschiedenen Richtungen hin an. Wie aber die Lichtstrahlen verschiedene und nach dem Austritte aus dem Krystalle ihnen noch bleibende Eigenschaften erhalten, wie überhaupt unpolarisirte und polarisirte Lichtstrahlen und die letzteren wieder untereinander sich unterscheiden könnten — darüber schien den Undulationstheoretikern vor der Hand gänzliches Schweigen der bessere Theil.

Auf diesem Gebiete schien der Emanationstheoretiker noch in entschiedenem Vortheile. Die Emissionstheorie erklärte die Brechung des Lichtes durch die Anziehung, welche die Molecüle der brechenden Körper auf die Lichtmolecüle bei ihrer Annäherung schon auf eine gewisse Entfernung hin ausübten. Laplace [3] leitete in diesem Sinne die Doppelbrechung durch eine zweifältige Art der Anziehung ab; eine Anziehung, welche auf die Molecüle des gewöhnlichen Strahles

---

[1] Gilbert's Annalen XL, S. 131.

[2] Quarterly Review, Novemberheft 1809.

[3] Mém. de l'Inst. X, 1809.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

unveränderlich, auf die des ausserordentlichen Strahles aber je nach dem Winkel, welchen der Strahl mit der optischen Achse bildet, veränderlich wirkt. Die Verschiedenheit der Anziehungen aber bewirkt eine Verschiedenheit in den Geschwindigkeiten der beiden Strahlen, und aus diesen verschiedenen Geschwindigkeiten ist endlich die verschiedene Brechung derselben abzuleiten. Bedeutet $v$ die Geschwindigkeit des ordentlichen, $v'$ die des ausserordentlichen Strahles, $U$ den Winkel des letzteren mit der Achse und $k$ einen Coefficienten, der für jede durchsichtige Substanz einen besonderen Werth erhält, so ist nach Laplace $v'^2 = v^2 + k sn^2 U$. Biot verbesserte später diese Formel, indem er ihr für optisch zweiachsige Krystalle die Gestalt $v'^2 = v^2 + k sn U sn U'$ gab. Zugleich zeigte der Letztere, dass $k$ sowohl positiv, wie auch negativ sein könne und unterschied danach anziehende und abstossende Krystalle[1]). Waren das alles auch nur ad hoc gemachte Annahmen, denen die fundamentale Verbindung fehlte, so boten sie doch den Vortheil, dass man nun in ähnlicher Weise auch die Polarität der Lichtstrahlen erklären konnte. War der Lichtstrahl aus einzelnen Molecülen zusammengesetzt, so hinderte nichts, diesen Molecülen verschiedene Kräftepole und eine Kräfteachse zuzuschreiben. Da nun die Reflexion und die Refraction des Lichtes nur durch attractive und repulsive Kräfte, welche die optischen Medien auf die Lichtmolecüle ausübten, zu Stande kamen, so liess sich leicht einsehen, dass sowohl bei der Reflexion wie bei der Refraction die Achsen der Lichtmolecüle, die im unpolarisirten Lichte alle möglichen Lagen haben, eben durch jene Kräfte einander parallel geordnet werden und so sich weiter halten könnten, dass ein polarisirter Lichtstrahl, je nach der Lage dieser Achsen zur Oberfläche eines durchsichtigen Körpers, entweder ganz reflectirt oder auch ganz durchgelassen werden müsse und dass bei einem unpolarisirten Lichtstrahl immer beides zugleich der Fall sein würde. Welche Lage diese Achse im Lichtmolecüle habe, bleibe unbestimmt oder vielmehr beliebig. Biot, der seit 1811 die Emissionstheorie sehr glücklich auf die Polarisation anwendete, nahm an, dass jene Polarisationsachse bei der Reflexion in die Einfallsebene falle.

Dieser Gedanke einer Polarität der Lichttheilchen zeigte sich auch weiter bei der Erklärung neuer, sehr complicirter optischer Phänomene als ein recht glücklicher. Arago[2]) las am 11. August 1811 im Institute

---

[1]) Mém. de l'Acad. d. sc. III, 1820. Lehrbuch der Experimentalphysik, Leipzig 1825, III, S. 348 und 349.

[2]) Dominique François Jean Arago wurde am 26. Februar 1786 in Estagel bei Perpignan geboren. 1803 kam er auf die polytechnische Schule. Anfang 1806 ging er mit Biot behufs Fortsetzung der von Méchain begonnenen Gradmessung nach Spanien. Dort wurde er nach dem Beginn der Feindseligkeiten zwischen Frankreich und Spanien gefangen gesetzt. Er flüchtete auf ein Schiff, das nach Algier segelte, wurde aber auf der Fahrt von dort nach Marseille von einem spanischen Kreuzer abermals gefangen. Nach seiner Freigabe auf der Reise abermals nach Algier verschlagen, kam er erst im Juli 1809

von Frankreich eine Abhandlung Sur une modification remarquable qu'éprouvent les rayons lumineux dans leurs passages à travers certains corps diaphanes[1]), in der er zeigte, dass durch Polarisation des Lichtes auch in ungefärbtem Licht Farben entstehen könnten. Polarisirt man einen Strahl weissen Lichtes, indem man ihn von einer unbelegten Glasplatte unter einem Winkel von 35⁰ (dem Polarisationswinkel) reflectiren lässt, so wird derselbe von einer zweiten parallelen Glasplatte vollständig unverändert reflectirt. Lässt man aber den polarisirten Lichtstrahl, ehe er auf die zweite Platte gelangt, senkrecht durch ein wasserhelles, recht dünnes Glimmerblättchen gehen, so erscheint der von der zweiten Platte reflectirte Lichtstrahl farbig. Die Art der Farbe hängt von der Dicke des Glimmerblättchens ab, aber immer entsteht bei einer Drehung der analysirenden Glasplatte um 90⁰ statt der ohne das Glimmerblättchen eintretenden Dunkelheit die der ersteren complementäre Farbe. Ganz entsprechende Erscheinungen erhält man, wenn man statt der Glasplatte als Analyseur einen Kalkspathkrystall gebraucht; ein Gypsblättchen bringt dieselben Farben nur noch lebhafter als ein Glimmerblättchen hervor, und auch dicke Platten von Bergkrystall erzeugen ganz ähnliche Phänomene. Da bei gekreuzter Stellung der Spiegel im Polarisationsapparate ohne Krystallblättchen absolut kein Licht zurückgeworfen wird, so müssen die Polarisationsachsen der Lichtmolecüle durch das Einschieben der Blättchen wieder aus ihrer Polarisationsebene gedreht, das Licht muss also, wie Arago sich ausdrückt, durch die Blättchen depolarisirt werden. Diese Depolarisation muss weiter von der Dicke des Blättchens abhängen und zwar so, dass bei zu grosser oder zu geringer Dicke überhaupt keine Depolarisation eintritt und dass innerhalb bestimmter Grenzen für irgend eine bestimmte Dicke immer nur Licht von einer bestimmten Farbe depolarisirt wird. Soweit Arago, der keine weitere Erklärung dieser Erscheinungen unternahm.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

Young sprach einige Jahre später die Ueberzeugung aus, dass auch diese Farben auf Interferenzen und zwar Interferenzen der in den

---

nach Frankreich zurück. Wenige Tage nach seiner Rückkehr wurde Arago zum Mitgliede der Akademie gewählt. Ebenfalls noch im Jahre 1809 folgte er Monge als Professor an der Polytechnischen Schule. Als Kammermitglied (seit 1831) hielt er sich zur äussersten Linken, als Mitglied der provisorischen Regierung im Jahre 1848 war er Kriegs- und Marineminister. Er starb am 2. October 1853 in Paris. „Eifrig nach Entdeckungen strebend und zugleich vorsichtig in den Folgerungen ... liebte er es vorzüglich, neue Wege zu gehen, auf denen man . . . die Identität der Ursachen verschiedenartiger Phänomene erkennen konnte. . . . Während er für die Gelehrten die Grenzen des Wissens hinausrückte, besass er andererseits eine wunderbare Kunst, die erworbenen Kenntnisse um sich her zu verbreiten. So fehlte ihm keine Art des Einflusses, und die Autorität seines Namens stand seiner Popularität nicht nach." (A. v. Humboldt.)

[1]) Mém. de l'Inst. XII, 1811. Uebersetzt in Gilbert's Ann. XL, S. 145 bis 161.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

dünnen Blättchen durch Doppelbrechung gebildeten ordentlichen und ausserordentlichen Strahlen zurückgeführt werden müssten; er konnte aber durchaus nicht erklären, was die doch absolut nothwendige Polarisation des Lichtes mit der ganzen Sache zu thun haben könnte[1]). Biot dagegen, der sich in mehreren Abhandlungen von 1812 bis 1814, wie auch in seinen Lehrbüchern der Physik, eingehend mit diesen Erscheinungen beschäftigte, kam auf Grund der Emissionstheorie zu einer recht plausiblen Erklärung; nur leider wieder auf Grund einer neuen Hypothese, die er unter dem Namen der mobilen Polarisation einführte. In seinem Lehrbuche der Experimentalphysik (IV, S. 160 und 161) giebt er die Theorie dieser mobilen Polarisation in drei Sätzen: 1) „Wenn ein Strahl mathematisch homogenen Lichtes, der nach einer festen Richtung polarisirt ist, senkrecht durch ein Blatt Fraueneis hindurchgeht, so dringen die Molecüle, aus denen er besteht, erst bis zu einer gewissen Tiefe hinein, ohne ihre ursprüngliche Polarisation zu verlieren; worauf sie, wenn sie sich noch weiter fortbewegen, periodisch um ihre Fortbewegungsachse zu oscilliren anfangen, so dass ihre Polarisationsachse abwechselnd nach einer oder der anderen Seite der Achse des Krystalles oder der darauf senkrechten Linie in gleicher Weite hinübergeht, wie ein Pendel nach beiden Seiten der Verticale oscillirt, aus der man es abgelenkt hat. Jede dieser Oscillationen geht in einer Dicke $2e$ vor sich, welche für jede Art Licht von bestimmter Brechbarkeit beständig ist; aber die erste Dicke, wo die Oscillationen einzutreten beginnen, ist im Allgemeinen ungleich für die verschiedenen Molecüle, aus denen dieses Licht besteht. 2) Für Strahlen von anderer Brechbarkeit ändert sich das periodische Intervall $2e$ in einem Verhältnisse, welches den Längen der Anwandlungen der Lichttheilchen für proportional gelten kann. 3) Diese Oscillationsbewegung wird gehemmt, wenn die Lichtmolecüle, angelangt an der zweiten Oberfläche des Blattes, in die Luft oder in irgend ein anderes Mittel austreten, welches der doppelten Brechung nicht theilhaftig ist.“ Danach stimmen also nach dem Durchgange des polarisirten Lichtes durch das dünne Blättchen die Polarisationsebenen der verschiedenen farbigen Strahlen nicht mehr unter sich und auch nicht mehr mit der ursprünglichen Polarisationsebene überein. Die Polarisationsebenen der verschiedenen, im weissen Lichte enthaltenen farbigen Strahlen sind alle gegen die ursprüngliche Polarisationsebene ein wenig gedreht und alle um verschiedene Grössen, und es müssen also bei einer Drehung des Analyseurs, oder Polariseurs oder auch des dünnen Blättchens immer andere Farben reflectirt oder auch durchgelassen werden.

Arago's Entdeckung der chromatischen Polarisation wurde von Brewster[2]) weiter verfolgt, der, seiner eigenen Angabe nach, sogar

[1]) Quarterly Review XI, 1814.

[2]) David Brewster am 11. December 1781 zu Jedburgh in Schottland geboren, beschäftigte sich von 1801 an mit physikalischen, vorzüglich optischen

unabhängig von Arago und ehe er noch von dessen Abhandlung Kenntniss hatte, zu denselben Resultaten wie Arago gekommen war. Brewster beschrieb in einem besonderen Werke, Treatise on New Philosophical Instruments (Edinburgh 1813), die von dem schwarzen Kreuze durchbrochenen kreisförmigen Farbenringe, welche senkrecht zur Achse geschnittene, optisch einachsige Krystalle, wie Beryll, Smaragd, Rubin etc. in convergentem, polarisirtem Lichte zeigen. Die Entdeckung der Figuren, welche man unter gleichen Umständen in zweiachsigen Krystallen bemerkt, gab er im nächsten Jahre in den Philosophical Transactions bekannt. Er machte danach auch darauf aufmerksam, dass man an diesen Figuren die ein- und zweiachsigen Krystalle leicht unterscheiden könne und dass nur das Rhomboëder, das regelmässige Hexaëder, das quadratische Octaëder und das quadratische Prisma von der ersteren Art seien. Indessen hatte Brewster weder diese Entdeckungen allein gemacht, noch die letzteren Figuren genau bestimmt, noch die Erklärung derselben gefunden. Wollaston war 1814, Biot und ebenso Seebeck waren im Jahre 1815 wenigstens theilweise, jedenfalls aber unabhängig, zu denselben Thatsachen gekommen. Dass die isochromatischen Curven bei zweiachsigen Krystallen die Form von Lemniscaten haben, zeigte erst John Herschel im Jahre 1820. Eine theoretische Ableitung der Erscheinungen versuchte zuerst Biot, der auch diese Phänomene auf seine Hypothese der mobilen Polarisation mit vielem Geschicke und nicht erfolglos zurückführte [1]).

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

Indessen wurde doch das Ringen Biot's immer aussichtsloser. Durch die eifrigen Bemühungen so vieler Physiker um „die prachtvollsten aller Erscheinungen in dem ganzen Gebiete der Optik" wurden nach und nach so viel Anforderungen an die Emissionstheorie gestellt, dass sie auch in den Händen eines Physikers wie Biot sich nicht mehr recht fügsam und biegsam zeigen wollte. Malus hatte schon entdeckt, dass ein Lichtstrahl, wenn er durch Platten durchsichtiger Substanzen hindurchgeht, die durch dünne Luftschichten getrennt sind, senkrecht zur Ebene der Brechung polarisirt wird. Brewster bemerkte dieselbe Eigenschaft auch an manchen Gesteinen, die ein blät-

---

Studien. Er wurde später Professor der Physik an St. Andrews, zuletzt Principal der Universität Edinburgh. Von 1819 bis 1824 gab er mit Jameson das Edinburgh Philosophical Journal, dann von 1824 bis 1832 allein das Edinburgh Journal of Science heraus. 1832 wurde er Mitherausgeber des London and Edinburgh Philosophical Magazine. Durch Veranstaltung einer Zusammenkunft in York gab er Veranlassung zur Begründung der British Association for the Advancement of Science, die wie die Deutsche Naturforscherversammlung alljährlich eine Sitzung in einer anderen Stadt Grossbritanniens abhält. Er starb am 10. Februar 1868 auf seinem Landgute Allerley bei Melrose. Brewster schrieb ausser seinen wissenschaftlichen Abhandlungen auch mehrere geschätzte Biographien von Astronomen und Physikern und einige populär physikalische Werke.

[1]) Siehe Lehrbuch der Experimentalphysik, Leipzig 1825, IV, S. 191 bis 203.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

teriges Gefüge haben, wie Achat u. s. w. Biot aber entdeckte um 1816 am Turmalin, der durchaus homogen erscheint, ähnliche Eigenschaften. Er fand, dass dünne Blättchen des Krystalles zwar noch das Licht doppelt brechen, dass dickere Platten aber nur den ausserordentlichen Strahl durchlassen und den ordentlichen absorbiren. Danach empfahl er schon zwei Turmalinplatten zur bequemen Beobachtung der Polarisation in Krystallen, konnte aber zur Erklärung dieser sonderbaren Eigenheit des Turmalins nichts weiter beibringen[1]).

Arago beschrieb in der schon erwähnten Abhandlung von 1811 über die chromatische Polarisation, dass eine 6 mm dicke Bergkrystallplatte zwischen dem Polariseur und Analyseur dieselben Farben wie ein dünnes Glimmerblättchen erzeugt, nur mit dem Unterschiede, dass eine Drehung des Glimmerblättchens die Farben ebenso ändert, wie eine Drehung des Analyseurs, während eine Drehung der Quarzplatte ohne Einfluss ist[2]). Biot fand, dass diese Farben dicker Platten ebenso wie die der dünnen Blättchen von einer Drehung der Polarisationsebene herrühren, die nur nicht wie bei den letzteren periodisch, sondern fest und der Dicke der Platten proportional ist. Biot constatirte noch, dass einige Bergkrystalle die Polarisationsebene constant links, andere ebenso constant rechts drehen, und dass auch viele Flüssigkeiten diese Drehkraft, wenn auch in geringerem Maasse als die Krystalle, besitzen. Eine weitere Ableitung dieser merkwürdigen Eigenschaften der Materien jedoch gelang ihm nicht[3]). Ebenso erging es bei der Metallreflexion. Malus hatte schon den Unterschied derselben von der Glasreflexion bemerkt; Arago und vor Allem Brewster hatten dieselbe genauer studirt. Biot, dem der Letztere in Briefen seine Beobachtungen mitgetheilt, versuchte diese Eigenthümlichkeiten derselben aus einer Mischung der festen und der beweglichen Polarisation abzuleiten; einen rechten Erfolg konnte er auch hier nicht erlangen[4]).

Uns bleibt nach Allem diesem noch eines zweiten Angriffes auf die Newton'sche Optik, nämlich der Farbenlehre Goethe's, zu erwähnen[5]). Nicht bloss darum, weil dieser Angriff von einer so be-

---

[1]) Lehrb. d. Experimentalphysik IV, S. 119.

[2]) Gilbert's Annalen XL, S. 151 bis 155.

[3]) Lehrb. d. Experimentalph. IV, S. 203 bis 209.

[4]) Ibid. IV, S. 218 bis 222. Jean Baptiste Biot, geboren den 21. April 1774 in Paris, wurde sehr bald, nachdem er den Artilleriedienst quittirt, Professor der Physik in Beauvais und 1800 in Paris am Collège de France. 1803 wurde er Mitglied des Institutes von Frankreich und 1809 Professor der Astronomie an der Facultät der Wissenschaften. Biot starb am 3. Februar in Paris. Seine sehr zahlreichen Abhandlungen erstrecken sich über die meisten Gebiete der Physik und Astronomie.

[5]) Beiträge zur Farbenlehre, Weimar 1791/92. Zur Farbenlehre, 2 Bände, Tübingen 1810. Goethe's sämmtliche Werke, bei J. G. Cotta 1858: Zur Farbenlehre, Bd. XXXVII und XXXVIII; Geschichte der Farbenlehre, Bd. XXXIX; Nachträge zur Farbenlehre, Bd. XL.

deutenden Persönlichkeit ausging, sondern auch darum, weil derselbe, trotz seiner verfehlten Grundlage, doch ein geistreich systematischer und in gewissen Folgen auch nicht ohne Nutzen war. Goethe kam von seinen künstlerischen Studien, von einer malerischen Betrachtung der Farbenwirkungen auf den Beschauer her, zu seinen optischen Untersuchungen. Bei seiner Anwesenheit in Rom, in seinem vielfachen Verkehre mit den dortigen Malern empfand er das Bedürfniss, für die verschiedenen Farbenwirkungen auf das Auge feste Anhaltspunkte und wissenschaftliche Gesetze zu finden. Für die anerkannten Unterschiede kalter und warmer Farben, für eine geahnte „unmittelbare Verwandtschaft des Blauen mit dem Schwarzen", für die Harmonie der Farben überhaupt suchte er in den optischen Theorien, in Newton's und seiner Nachfolger Werken, nach Erklärungsgründen und festen Beurtheilungsprincipien, aber mit gänzlich negativem Erfolge. Er nahm sich vor, die betreffenden optischen Versuche Newton's, die er auf der Universität (weil sie immer auf gelegentlichen Sonnenschein verschoben wurden) nicht gesehen, selbst nachzusehen und ihre Fruchtbarkeit in Bezug auf seine Zwecke zu prüfen. Er lieh sich dafür nach seiner Rückkehr nach Weimar vom Hofrath Büttner aus Jena verschiedene optische Apparate, kam aber über anderweitigen Beschäftigungen lange Zeit nicht zum Gebrauche derselben, bis endlich Büttner einen Boten zur Abholung seiner Apparate sandte. Da wollte Goethe doch, um nicht ganz ohne Nutzen das Geliehene zurückzugeben, noch einen Versuch machen. Er nahm das Glasprisma, sah in einem völlig geweissten Zimmer nach einer der vollkommen weissen Wände und sah trotz der Brechung, die dabei eintreten musste, absolut keine Farbe, sondern eitel reines Weiss, und nur da, wo die Wand durch das Fenster etc. begrenzt war, konnte er Farbensäume bemerken. Also, schloss Goethe, hat Newton doch in einem Fundamentalpunkte Unrecht, mit der Brechung ist die Entstehung von Farben nicht nothwendig verbunden, und die Farben haben also ihre Ursache nicht nothwendig in der Brechung.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

Das war für Goethe eine Erlösung, denn die Newton'sche Lehre von der Zusammensetzung des weissen Lichtes aus verschiedenen Farben erschien ihm eine ungeheuerliche Annahme und das Grundhinderniss jeder rationellen Farbenlehre. Nach Newton ist jeder Lichtstrahl an sich farbig und zwar roth, gelb, grün, blau, violett, je nachdem die von dem leuchtenden Körper ausgesandten leuchtenden Molecüle in ihm grösser oder kleiner sind. Wie kommt aber das blaue Licht mit seinen kleineren Lichtmolecülen dazu, auf unser Auge einen dunkleren Eindruck zu machen, und warum sind Gelb und Roth mit ihren grösseren Lichtmolecülen warme Farben? Wie ist überhaupt das Zusammenstimmen mancher Farben, die absolut unangenehme Empfindung, welche andere bei ihrer Zusammenstellung in

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

uns erregen, möglich, wenn die Eigenthümlichkeit der Farben nur in der Grösse der Lichtmolecüle beruht? Wie ist es endlich nur denkbar, dass das uns am reinsten, am homogensten erscheinende Licht, das weisse in jedem einzelnen, noch so feinen Lichtstrahle aus mindestens je sieben Lichtmolecülstrahlen von verschiedenen Grössen, die den einzelnen Farben entsprechen, zusammengesetzt sein soll? Weiss und Schwarz sind elementare, polare Gegensätze, wie Licht und Nichtlicht, die in jeder Farbe zum Theil vereinigt sind, durch deren Vereinigung nur die Farben entstehen[1]); ebensowenig wie bei Schwarz ist also bei Weiss an eine Zerlegung zu denken. Newton hat auch durch Mischen der Farben niemals wieder Weiss hervorbringen können, sondern immer nur ein mehr oder weniger dunkles Grau, ein unwiderlegliches Zeichen dafür, dass die Farben nicht in ihrer Gesammtheit das Weiss bilden, sondern eine Mischung aus Licht und Finsterniss sind. Newton berücksichtigt endlich gar nicht, dass das Auge selbstständig Farben hervorbringen kann. Er verlegt die Farben ganz allein in das Licht selbst, während bei ihrer Entstehung doch das Auge ohne Zweifel stark betheiligt ist. So zeigt sich die Newton'sche Farbenlehre voll so vieler Unwahrscheinlichkeiten und Unzulänglichkeiten, dass sie kaum besser als keine Theorie, und dass sie jedenfalls zu verlassen ist, wenn eine andere Theorie die Farbenerscheinungen mehr wahrscheinlich und vollständiger erklärt. Eine solche Theorie aber meint Goethe in seiner Farbenlehre zu liefern.

Das Auge wird durch die polaren Gegensätze, Licht und Finsterniss, in zwei völlig entgegenstehende Zustände versetzt, in den der äussersten Ueberspannung und Unempfänglichkeit und den der höchsten Abspannung und Empfänglichkeit. Beide Zustände erhalten sich auch noch etwas nach Aufhören des äusseren Reizes, aber von jedem derselben verlangt auch immer das Auge in den anderen überzugehen. Die Farben ähneln in dieser Beziehung den äussersten Gegensätzen und bilden mittlere Gegensätze, durch welche hindurch die äussersten sich ausgleichen. Das Auge ist „zu einer Art von Opposition genöthigt, die, indem sie das Extrem dem Extremen, das Mittlere dem Mittleren entgegensetzt, sogleich das Entgegengesetzte verbindet, und in der Succession sowohl als in der Gleichzeitigkeit und Gleichörtlichkeit nach einem Ganzen strebt[2])". Lässt man durch eine kleine Oeffnung im Laden eines dunkeln Zimmers einen Sonnenstrahl auf ein weisses Papier fallen, fixirt den entstehenden

---

[1]) Sämmtliche Werke XXXVII, S. 240 bis 245. Die Vorstellung von Weiss und Schwarz als polaren Gegensätzen ist wohl durch die Nachkantische Naturphilosophie mit hervorgerufen. Goethe führt unter den Gönnern seiner Farbenlehre Schelling ausdrücklich an (XXXIX, S. 452), und Hegel schrieb noch 1821 an Goethe einen der Farbenlehre enthusiastisch zustimmenden Brief (XXXX, S. 46).

[2]) Sämmtl. Werke XXXVII, S. 21.

weissen Kreis längere Zeit und schliesst dann die Oeffnung, so wird man kurze Zeit lang noch immer den hellen Kreis sehen. Sogleich aber wird sich der Rand gelb, dann purpurn färben; die Purpurfarbe wird sich dann über den ganzen Kreis ziehen, der Rand aber blau werden, auch das Blau wird später den ganzen Kreis überdecken, dafür aber der Rand dunkel werden, bis endlich die Dunkelheit das ganze Bild vernichtet. Wie hier nach einander, erzeugt das Auge die Farben auch simultan; fixirt man einen grünen Fleck auf weisser Fläche, so erscheint bald die weisse Fläche purpurn gefärbt. Meereswellen, die auf erleuchteter Seite grün erscheinen, zeigen auf der beschatteten Seite Purpurfarbe, und dem über eine grüne Wiese Wandelnden leuchten oft die Baumstämme und Wege mit röthlichem Scheine. Eine Erscheinung, die Landschaftsmaler schon längst unbewusst nachgeahmt haben. Besonders schön zeigen diese Phänomene auch die farbigen Schatten. Erzeugt man durch schwaches Sonnenlicht (in der Dämmerung) und durch Kerzenlicht zwei Schatten eines Stabes, so wird der vom Kerzenlicht beleuchtete Schatten durch dieses gelb erleuchtet werden, der andere aber dafür in der entgegengesetzten Farbe blau erscheinen. Entwirft man die zwei Schatten durch zwei Kerzen und färbt das Licht der einen durch beliebig gefärbtes Glas, so wird immer der Schatten dieses Lichtes in der entgegengesetzten Farbe gesehen werden.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

Die bis jetzt beschriebenen Farben gehören direct dem Auge an, so dass sie von demselben als eine Gegenwirkung auf einen äusseren Reiz erzeugt werden, als solche nennt sie Goethe physiologische Farben. Ihnen stehen die den Körpern eigenthümlichen, bleibenden Farben gegenüber, die Goethe chemische Farben nennt. Die Mitte zwischen beiden nehmen die Farben ein, die von durchsichtigen, an sich farblosen Körpern in unserem Auge erzeugt werden, die physikalischen Farben. Die Ursache dieser letzteren meint Goethe darin zu finden, dass das Licht, wenn es durch ein trübes Mittel (einen mehr oder weniger durchsichtigen Stoff) in das Auge gelange, je nach der geringeren oder grösseren Trübe gelb, gelbroth oder rothpurpurn erscheine, und dass die Dunkelheit durch ein mehr oder weniger beleuchtetes trübes Mittel blau, dunkelblau oder auch violett gesehen werde. Die Farben sind also nicht der Qualität nach verschiedene Lichter wie bei Newton, sondern nur Halblichter oder Halbschatten. Goethe bezeichnet jene Wirkungen der trüben Medien als Urphänomene und verificirt dieselben durch Beispiele (wie die Färbung der Sonne durch Höhenrauch, die Morgen- und Abendröthe, die Färbung entfernter Gebirge, der Eisberge, die Fluorescenzerscheinungen etc.), merkwürdigerweise aber nicht durch bestimmt angegebene Experimente. Die Urphänomene dienten Goethe unbewusst wohl als Urdefinitionen der Farben, deren Wahrheit ihm unumstösslich durch seinen Ausgangspunkt, wie durch seine Erfolge wurde. Darum wird er auch in seiner Polemik immer gerade da am heftigsten, wo es sich

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

um Newton's entgegenstehende Definition der Farben, als verschiedener durch ihre verschiedene Brechbarkeit charakterisirter Lichter handelt. Er betrachtet diese Definition Newton's direct als erschlichen. Weil die Entstehung des prismatischen Farbenbildes sich auch auf andere Art als durch jenes Theorem erklären lasse, so sei jener Satz nicht ein bewiesener Lehrsatz, sondern nur eine Hypothese und dass sie nicht als solche, sondern als ein Theorem bezeichnet werde, darin liege eben der Betrug. Newton's Definition der Farben stützt sich auf seinen ersten Versuch, auf die Erzeugung eines Farbenspectrums durch ein schmales Lichtbündel, welches durch ein Prisma gebrochen wird. In dieser Form aber ist der Versuch, auf dem die ganze Optik ruht, viel zu complicirt, um richtig beurtheilt werden zu können. Stellt man denselben möglichst einfach an, sieht man durch ein Prisma auf eine weisse Wand oder lässt man das unbegrenzte Licht voll auf das Prisma fallen, so bemerkt man gar keine Farben oder nur ganz schwachfarbige Säume. Das zeigt, dass mit der Brechung die Farben nicht nothwendig verbunden sind, und wenn Newton in diesen Fällen das Weiss hier erst durch Vermischen von Farben erklärt, so trägt er nur seine ohne Grund gemachte Voraussetzung der Zusammengesetztheit des weissen Lichtes künstlich in die Erscheinung hinein. Es ist absolut kein Grund vorhanden, die Farben als das Primäre anzunehmen und daraus das Weiss zu erklären, wo der umgekehrte Weg möglich ist [1]). Auch herrscht in allen natürlichen Brechungserscheinungen das Weiss vor; die Farben entstehen immer nur an den Grenzen der Bilder und bedürfen zu ihrer Entstehung der Grenze. Das wird zum schönen Beweise von der Theorie gefordert und von der Beobachtung bestätigt. Sehen wir durch ein Prisma nach einem weissen Streifen auf schwarzem Papier, so wird durch die Brechung der weisse Streifen über das Schwarze hin verschoben, und nach der Lehre von den trüben Medien muss er sich dort blau zeigen; umgekehrt wird an der anderen Seite die schwarze Begrenzung über das Weiss hereingeschoben und lässt also hier einen gelben Saum erscheinen [2]).

---

[1]) „Lichter — mit diesem Plural kommt die Sub- und Obreption, deren sich Newton durch das ganze Werk schuldig macht, gleich recht in Gang. Lichter, mehrere Lichter! und was denn für Lichter? . . . Wir operiren schon mit farbigen Lichtern, und erst hinterdrein vernehmen wir, wie und wo etwa ihr Ursprung sein möchte. . . . Newton stellt den complicirtesten subjectiven Versuch, den es vielleicht giebt, an die Spitze, verschweigt seine Herkunft, hütet sich, ihn von mehreren Seiten darzustellen, und überrascht den unvorsichtigen Schüler, der, wenn er einmal Beifall gegeben, sich in dieser Schlinge gefangen hat, nicht mehr weiss, wie er zurück soll." Sämmtliche Werke, XXXVIII, S. 12 bis 17.

[2]) Ganz so einfach, wie wir hier der Kürze wegen die Sache dargestellt, ist indessen selbst bei Goethe dieselbe nicht. Wenn wir durch das Prisma den weissen Strich ansehen, so verschiebt sich alles Gesehene gleichmässig, und Licht und Dunkelheit werden also dadurch noch nicht über einander fallen. Goethe meint, dass bei jeder Brechung zwei verschieden helle Bilder, ein

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

Die Mitte des Bildes, die nicht selbst bis zum Dunkeln verschoben und in die auch das Dunkle nicht hereingerückt ist, bleibt dabei im Allgemeinen weiss; nur wenn der leuchtende weisse Strich sehr schmal ist, schliessen sich, wie leicht zu erklären, die Farbensäume an einander und bilden ein fortlaufendes Spectrum. Auf ähnliche Weise wie die Spectralerscheinungen der Brechung, durch Mischung von Licht und Dunkelheit, erklärt nun Goethe auch die Beugungsfarben (Paroptische Farben), die Farben dünner Blättchen (Epoptische Farben) etc. Immer zeigt er, dass sich die Farben nur an der Grenze von Licht und Schatten, als Säume an den Rändern der Bilder entwickeln. Das Fundamentalexperiment der Newton'schen Farbenlehre, bei welchem das Licht durch eine sehr enge Spalte gezwängt und durch Zusammentreiben der Säume ein zusammenhängendes Farbenbild erzeugt wird, ist also nicht ein allgemeines, sondern ein ganz specielles Phänomen, das nur durch besondere Kunst erzwungen wird. Dieser Zwang, den Newton der Natur anthut, rächt sich bitter dadurch, dass nun alle Erscheinungen sich nur höchst gezwungen der aus einem einzelnen, falsch verstandenen Experimente erzeugten Theorie anpassen lassen.

Hier tritt zu dem principiellen Gegensatze Goethe's gegen Newton in Bezug auf die Natur des Lichtes noch ein methodischer, der den ersten verschärft und die Verständigung unmöglich macht. Dem Dichtergenie, dem enthusiastischen Naturfreunde und erfolgreichen Forscher auf dem Gebiete der organischen Entwickelungslehre erscheint die ganze Natur als ein Organismus, der sein eigenes Leben und seine eigenen Erscheinungsformen hat. Der sich liebevoll der Beobachtung dieses Lebens hingebende, der die Natur in ihrem Wirken belauschende Mensch mag dasselbe nach und nach verstehen lernen. Derjenige aber, der mit Gewalt die Geheimnisse der Natur aufdecken will, der die Natur zwingt seiner Beobachtung still zu halten, der ihr seine besonderen Bedingungen der Erscheinungen aufnöthigt, der stört das Leben der Natur, und seine Beobachtungen werden von Abnormitäten, aber keinen natürlichen Erscheinungen zu erzählen haben. Darum lässt sich gar nicht erwarten, dass aus Newton's Experimenten, für die er das Licht durch allerlei enge Spalten und complicirte Apparate hindurchzwängt, die Gesetze der Lichterscheinungen rein heraustreten werden, und jeder vorurtheilslose, denkende Naturforscher muss einsehen, dass auf diesem Wege über die Natur des reinen, freien Lichtes nichts auszumachen ist [1]).

Dass dieser methodische Gegensatz Goethe's gegen Newton die Physiker nicht auf die Seite des ersteren herüberziehen konnte, ist klar.

---

helleres Haupt- und ein dunkleres Nebenbild entstehen, die bei der Brechung nicht ganz gleichmässig verrückt werden und so theilweise zur Deckung kommen. (Sämmtl. Werke, XXXVII, S. 81 bis 88.)

[1]) Auf diesen Punkt hat Helmholtz (Popul. wissenschaftl. Vorträge, Braunschweig 1865, 1. Heft, S. 43) aufmerksam gemacht.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

Denn mochte Goethe denselben auch nicht überall so streng festhalten, als er oben angedeutet ist, mochte er für Goethe auch eine grössere Berechtigung insofern haben, als dieser dem Auge den Haupttheil bei der Erzeugung der Farben zuschrieb, so beruhte er doch zum grossen Theile auf einer Verkennung des methodischen Unterschiedes der organischen und der mechanisch-physikalischen Wissenschaften. Indessen lag der Hauptgrund, warum die Physiker sämmtlich zu Gegnern der Goethe'schen Farbenlehre wurden und selbst diejenigen, welche, wie Seebeck z. B., im Anfange derselben geneigt waren, sich schliesslich von derselben abwandten, auf einem anderen Gebiete. Was der Newton'schen Farbenlehre, trotz mancher bösartigen Voraussetzungen, so viele und treue Anhänger verschaffte, war ihre mathematische Bestimmtheit und die Bequemlichkeit ihrer Hypothesen gegenüber mathematischen Entwickelungen. Gerade hier aber besass die Goethe'sche Theorie ihre grösste Schwäche. Goethe war sich darüber nicht unklar und nach dieser Seite hin der Grenzen seines Talentes wohl bewusst[1]). Theils aber meinte er, dass bei einer Farbenlehre, die doch zumeist auf unmessbare Empfindungen gegründet sei, mathematische Feststellungen der quantitativen Grössenverhältnisse weniger nothwendig seien und bemühte sich darum, an mehreren Stellen die Physiker von den Mathematikern zu trennen und Letzteren unnöthige und unfruchtbare Uebergriffe in fremde Gebiete nachzuweisen[2]). Theils aber hoffte er auch, dass mathematisch gebildete Physiker, die Lücken seiner Naturanlage ergänzend, seiner Farbenlehre die fehlenden mathematischen Bestimmungen noch anfügen könnten[3]).

Dass dies letztere überhaupt nicht möglich, dass seine Theorie einer mathematischen Behandlung nicht fähig war, darin liegt der folgenreichste Irrthum Goethe's, den alle Physiker bald herausfühlten, von dessen Wichtigkeit aber Goethe, so wie er nun einmal war, nicht überzeugt werden konnte. Von den Urphänomenen (den Farben der trüben Mittel) an bis zu den Nebenbildern, welche bei der Brechung entstehen und den Hauptbildern vor- oder

---

[1]) An den Mineralogen Naumann z. B. schrieb er, als ihm dieser seine Schrift über Krystallographie übersendet: „Ew. Wohlgeboren mir zugesendete Schrift kommt bei mir zur guten Stunde und ich habe sie sogleich bis Seite 45 mit Vergnügen gelesen. Hier aber stehe ich an der Grenze, welche Gott und Natur meiner Individualität bezeichnen wollten. Ich bin auf Wort, Sprache und Bild im eigentlichsten Sinne angewiesen und völlig unfähig, durch Zeichen und Zahlen, mit welchen sich höchst begabte Geister leicht verständigen, auf irgend eine Weise zu operiren.“ (Goethe's naturwissensch. Correspondenz, 2 Bde., Leipzig 1874, Nro. 205.)

[2]) Sämmtl. Werke XL, S. 468 bis 482.

[3]) Ibid. XXXVII, S. 10.

Undulationstheorie, Polarisation des Lichtes, Farbenlehre, c. 1800 bis c. 1815.

nacheilen, war nicht bloss keine einzige quantitative Bestimmung der Lichterscheinungen, sondern nicht einmal ein Begriff zu finden, der überhaupt eine solche zugelassen hätte. Das trieb den Physiker von Goethe's Farbenlehre absolut weg und zwang ihn zu der seines Gegners Newton.

Schliesslich wurde auch Goethe's stärkstem Einwande gegen eine physikalische Farbenlehre, dem Widerspruche gegen die verschiedenfarbigen Lichter in dem weissen Lichte, durch die Aufgabe der Emissionstheorie und die Annahme der Undulationstheorie des Lichtes der Boden ganz entzogen. Es ist nicht zu leugnen, dass die Newton'sche Hypothese von der Zusammensetzung jedes noch so feinen weissen Lichtstrahles aus sieben Strömen verschieden grosser Lichtmolecüle, wie alle daraus folgenden Consequenzen eine höchst grobdrähtige und schwer als Wirklichkeit anzunehmende Vorstellung war. Selbst nach der Emissionstheorie schien die Behauptung einer gleichartigen Beschaffenheit der Lichtmolecüle als das natürlichste und die Vorstellung von der Ungleichheit derselben als künstlich hineingetragen. Dies änderte sich aber mit Annahme der Undulationstheorie. Hier war die Annahme vieler verschiedenartiger, je nach der Geschwindigkeit der stattfindenden Schwingungen verschiedenfarbiger Lichter eine ganz widerspruchsfreie, nicht zu umgehende Annahme. Auch die Zusammensetzung eines Strahles aus verschiedenen Strahlen, einer Welle aus mehreren Wellen, war nach Analogie der Töne und ihrer Harmonien nicht mehr fremdartig; selbst die Möglichkeit verschiedener Lichtintensitäten der Farben, ihres Zusammenstimmens und ihres Widerstreites liess sich nun eher übersehen. Ob Goethe auch nach dem Herrschendwerden der Undulationstheorie noch seine Farbenlehre ausgearbeitet hätte, mag ich nicht entscheiden. Jedenfalls war er nach dem Siege dieser Theorie in den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts nicht mehr in der Lage, eine Revision seiner Arbeit noch vorzunehmen. Ueber die Preisaufgabe der Petersburger Akademie vom Jahre 1826, welche einen Entscheid zwischen den verschiedenen optischen Theorien forderte, äussert er sich reservirt, hofft aber doch von den bevorstehenden Arbeiten reichen Gewinn und bedeutende Förderung auch der auf die Farbenlehre bezüglichen Theile der Wissenschaft.

Das Verfehlte in dem physikalischen Theile von Goethe's Farbenlehre wurde, früher vor Allem, mehr als es nöthig war dem ganzen Werke angerechnet und auch auf die Theile desselben übertragen, die trotz jenem ihren Werth und ihre Gültigkeit behielten. In neuerer Zeit ist man auch der Farbenlehre wieder gerechter geworden und bewundert an ihr, neben manchen feinen Beobachtungen über die physiologischen Farben, überall den Sinn und das Gefühl für das ästhetisch Wirkende und künstlerisch Gesetzmässige, wie das Klare und Geistreiche der Darstellung.

---

## 2.

## Zweiter Abschnitt der Physik in den letzten hundert Jahren.

Von circa 1815 bis circa 1840.

---

### Periode der Kraftverwandlungen.

Niemals hat die herrschende Philosophie weniger Einfluss auf die Physik gehabt, als in den beiden mittleren Perioden unserer letzten hundert Jahre, niemals aber stand auch die erstere in solch methodischem Gegensatz zur letzteren, als gerade in dieser Zeit. Hatte Schelling im Anfange dieses Jahrhunderts die in der damaligen Physik epochemachenden Gegensätze zwischen anziehenden und abstossenden Kräften, die polaren Eigenschaften von Magnetismus und Elektricität verallgemeinert, auf einen polaren Gegensatz zwischen Subjectiven und Objectiven zurückgeführt und schliesslich die ganze Welt auf die werdende Einheit dieses Gegensatzes gegründet, so war doch bei ihm immer der zweifache Ausgangspunkt der Erkenntniss des Objectiven oder des Subjectiven und damit auch die Erfahrung als Grundlage der Naturwissenschaft geblieben. „Wir können“, sagt Schelling wörtlich, „von der Natur zu uns, von uns zu der Natur gehen, aber die wahre Richtung für den, dem das Wissen über Alles geht, ist die, welche die Natur selbst genommen hat“.

Bei Hegel[1]) dagegen, der philosophischen Autorität der zwei mittleren Viertel unseres Jahrhunderts, giebt es nur einen Aus-

---

[1]) Georg Wilhelm Friedrich Hegel (27. Aug. 1770 Stuttgart — 14. Nov. 1831 Berlin) war der Sohn eines Rentkammersecretairs in Stuttgart und studirte

gangspunkt für die Wissenschaft und nur ein Object der Behandlung, die Idee. Die Natur, sagt er in seinen „Vorlesungen über die Naturphilosophie"[1], ist die Idee in der Form des Andersseins, das Negative der Idee. Die Natur ist in der Zeit das Erste, aber das absolute prius ist die Idee; dieses absolute prius ist das Letzte, der wahre Anfang, das $A$ ist $\Omega$. Das Aussersichsein zerfällt sogleich in zwei Formen, einmal als positiv, der Raum, dann als negativ, die Zeit. Das erste Concrete, die Einheit und Negation dieser abstracten Momente, ist die Materie; indem diese auf ihre Momente bezogen ist, sind sie selbst auf einander bezogen, in der Bewegung. Die Materie ist die Form, in welcher das Aussersichsein der Natur zu ihrem ersten Insichsein kommt, dem Fürsichsein, das ausschliessend und damit eine Vielheit ist, welche ihre Einheit, als das für sich seiende Viele in ein allgemeines Fürsichsein zusammenfassend, in sich zugleich und noch ausser sich hat — die Schwere. Die Materie hält sich gegen ihre Identität mit sich, durch das Moment ihrer Negativität, ihre abstracten Vereinzelungen auseinander; die Repulsion der Materie. Ebenso wesentlich ist, weil diese Verschiedenen ein und dasselbe sind, die negative Einheit dieses aussereinanderseienden Fürsichseins; die Materie ist somit continuirlich, — ihre Attraction. Im Begriffe der Schwere sind die beiden Momente des Fürsichseins und der das Fürsichsein aufhebenden Continuität enthalten. Die Gravitation ist der wahrhafte und bestimmte Begriff der materiellen Körperlichkeit, der zur Idee realisirt ist. Die erste qualificirte Materie ist die Materie als reine Identität mit sich, als Einheit der Reflexion-in-sich, somit ist sie nur die erste, selbst noch abstracte Manifestation. In der Natur daseiend, ist sie die Beziehung auf sich als selbstständig gegen die anderen Bestimmungen der Totalität. Dies existirende

---

von 1788 bis 1793, wie Schelling, in Tübingen als Mitglied des theologischen Stifts. Nachdem er längere Zeit Hauslehrer gewesen, wurde er 1801 Docent und 1805 ausserordentlicher Professor in Jena. Doch gab er diese Stellung der Kriegsereignisse wegen bald auf, redigirte bis 1808 die Bamberger Zeitung, dirigirte bis 1816 das Aegidiengymnasium in Nürnberg, trat 1816 eine Professur der Philosophie in Heidelberg, und 1818 endlich eine solche in Berlin an. Von da an wuchs sein Einfluss und seine Philosophie begann herrschend zu werden.

[1]) Hegel's sämmtliche Werke VII, 1. Abth., Berlin 1842.

allgemeine Selbst der Materie ist das Licht; als Individualität, der Stern; und derselbe als Moment einer Totalität, die Sonne. Das Spröde, als an sich seiende Totalität der formirenden Individualität, schliesst sich zum Unterschiede des Begriffs auf. Der Punkt geht zunächst in die Linie über, und die Form setzt sich an derselben in Extreme entgegen, welche als Momente kein eigenes Bestehen haben, sondern nur durch ihre Beziehung, welche erscheinend ihre Mitte und der Indifferenzpunkt des Gegensatzes ist, gehalten sind. Dieser Schluss macht das Princip der Gestaltung in ihrer entwickelten Bestimmtheit aus, und ist, in dieser noch abstracten Strenge, der Magnetismus. Die Elektricität ist der reine Zweck der Gestalt, der sich von ihr befreit: Die Gestalt, die ihre Gleichgültigkeit aufzuheben anfängt; denn die Elektricität ist das unmittelbare Hervortreten, oder das nah von der Gestalt herkommende, noch durch sie bedingte Dasein — oder noch nicht die Auflösung der Gestalt selbst, sondern der oberflächliche Process, worin die Differenzen die Gestalt verlassen, aber sie zu ihrer Bedingung haben und noch nicht an ihnen selbstständig sind.

Von dieser Höhe der Anschauung, oder besser von diesem Spiel mit Worten, führte keine Brücke mehr zur Natur, und selbst das Verständniss der naturwissenschaftlichen Methode war von hier aus nicht mehr möglich[1]). Da war es nicht zu verwundern, wenn auch die Physiker ihrerseits im Kampfe gegen eine das Wesen ihrer Wissenschaft negirende, herrschende Philosophie nicht bloss die Aussprüche dieser verwarfen, sondern überhaupt die Ansprüche aller Natur-

[1]) Wir haben im Vorigen die Ansichten Hegel's fast ausschliesslich mit Hegel's Worten wiedergegeben. Wir wollen dabei aber nicht unterlassen zu bemerken, dass in seinen Vorlesungen über Naturphilosophie auch Momente sich finden, welche den grossen Einfluss, den Hegel seiner Zeit auf die Philosophie ausgeübt, mehr als das Vorhergehende möglich erscheinen lassen. Nur eine Stelle, die einigermaassen an das nachgelassene Kantwerk anklingt, zum Beweise: Indem Bewegung ist, so bewegt sich Etwas; dieses dauernde Etwas ist die Materie. Raum und Zeit sind mit Materie erfüllt. Der Raum ist seinem Begriffe nicht angemessen; es ist daher der Begriff des Raumes selbst, der in der Materie sich Existenz verschafft. Man hat oft mit der Materie angefangen und Raum und Zeit dann als Formeln derselben angesehen. Das Richtige daran ist, dass die Materie das Reale an Raum und Zeit ist. Wie es keine Bewegung giebt ohne Materie, so auch keine Materie ohne Bewegung.

philosophie auf einen Theil Arbeit an ihrer Wissenschaft mit Hohn und Erbitterung zurückwiesen. Sagt doch selbst der Philosoph Harms[1]) von jener Idealitätsphilosophie: „Die Construction der Natur aus ihrem Endzwecke im Menschen verwechselt stets das empirisch Erkennbare mit den allgemein nothwendigen Begriffen des Denkens. Aus der absoluten Höhe der Construction aus Begriffen, verfällt sie in einen rohen Empirismus, der seine Erfahrung, die er zufällig macht, als Maassstab aller erkennbaren Wahrheit verwendet.“ Und Joh. Huber urtheilt in seiner Abhandlung „Die Forschung nach der Materie“[2]): In der nachkantischen Philosophie hat nur Herbart den Geist der nüchternen kritischen und analytischen Behandlung des Problems sich bewahrt; während Andere wahre Ungeheuer der Phantasie in den Definitionsversuchen der Materie ausbrüteten, wie z. B. Emil von Schaden, welcher das eigentliche Wesen der Materie als einen gleichsam nicht seienden Urwind bezeichnete, dessen unermessliche, sich immer von Neuem und wieder von Neuem aus sich selbst producirende Activität jede eindringende, sie irgendwie bezwingen wollende Macht unwiderstehlich zurückweise.

In der That ist Herbart's Naturphilosophie[3]) auch für den Physiker interessant und hätte mehr Beachtung verdient, als sie ihrer Zeit und bis jetzt noch gefunden hat. Nach Herbart[4]) sind die gegebenen Formen der Erfahrung der Art, dass sie widersprechende Begriffe liefern. Da aber solche Begriffe unmöglich sind, so kann der Widerspruch nur auf einem Schein beruhen, der vom wirklichen Sein getrennt werden muss, d. h. es bleibt zu erklären, wie aus dem reellen Sein jener

---

[1]) Encyclopädie der Physik, herausgegeben von Karsten I, S. 255, Leipzig 1856.

[2]) München 1877, S. 16.

[3]) Allgemeine Metaphysik nebst den Anfängen der philosophischen Naturlehre, Königsberg 1828 bis 1829. Theoriae de attractione elementorum principia metaphysica, Königsberg 1812. Hauptpunkte der Metaphysik, Göttingen 1806 und 1808. Diese Schriften wieder abgedruckt in Herbart's sämmtlichen Werken, Leipzig 1850 bis 1852, Bd. III u. IV.

[4]) Johann Friedrich Herbart (4. April 1776 Oldenburg — 14. August 1841 Göttingen), der Sohn eines Juristen, studirte in Jena von 1794 an. Nachdem er von 1797 bis 1800 Hauslehrer gewesen, dann zwei Jahre privatisirt, habilitirte er sich 1802 als Docent der Philosophie und Pädagogik in Göttingen. 1805 daselbst ausserordentlicher Professor, 1809 ordentlicher in Königsberg, kehrte er 1833 wieder nach Göttingen zurück.

Schein entstehen kann, und damit werden zugleich die Widersprüche gelöst. Jedes Seiende, d. h. jedes Wesen, ist seiner Natur nach ein einiges, das jede Negation und jede Relation, also jede Vielheit und jede Veränderung ausschliesst. Jedes Wesen aber zeigt sich in unserer Erfahrung mit vielen Eigenschaften begabt, so bleibt zu erklären, wie das Eine uns als Vieles erscheinen kann. Alle Wesen zeigen sich in der Erfahrung veränderlich, so bleibt zu erklären, wie das unwandelbare Sein sich zu verändern und also immer zu negiren scheinen kann. Jedes Wesen erscheint als ausgedehnt und dehnbar, so bleibt zu erklären, wie das Einfache vielfach erscheinen kann.

Diese Erklärungen aber gelingen nur unter der Annahme, dass in Wirklichkeit viele einfache, ausdehnungslose und unveränderliche Wesen existiren. Wenn viele solcher einfachen Wesen zusammen sind oder zusammen kommen, so werden dieselben nothwendig einander stören, diesen Störungen gegenüber muss jedes Wesen sich zu erhalten suchen. So entstehen aus diesen gegenseitigen Störungen und den Actionen der Selbsterhaltung bei den vielen einzelnen Wesen Vielheiten von Relationen, die sich uns dann als besondere Eigenschaften der Einzeldinge vorstellen. Diese Eigenschaften bilden unsere Erfahrung, kommen aber nicht den Dingen an sich zu, sondern sind nur Relationen, die aus dem Zusammensein der vielen Einzelwesen hervorgehen. Darum ist jede Annahme von ursprünglichen Kräften in der Materie ein Fehler. Die Ursachen der natürlichen Veränderungen sind nicht transient (denn die einfachen Wesen geben und nehmen einander nichts), nicht immanent (denn jedes Wesen ist die Ursache der Selbsterhaltung des andern), sind keine transscendentalen Freiheiten (die Selbsterhaltungen erfolgen unausbleiblich, wenn die Wesen zusammen sind), keine Regeln der Zeitfolge (denn das Zusammensein bedingt direct Störung und Selbsterhaltung), liegen nicht in besonderen Vermögen (die Erhaltung findet nur zwischen den Wesen, nicht in denselben statt), liegen nicht in Tendenzen oder Trieben (denn keine Qualität eines realen Wesens ist bedürftig) und liegen auch nicht im Wesen der Kraft (denn die Wesen selbst, ganz und un-

getheilt, werden Kräfte). Alle die existirenden einfachen Wesen sind an sich ohne äussere Verhältnisse, existiren also auch nicht in einem Raume und sind ohne körperliche Ausdehnung. Die Erscheinung der Materie geht erst aus dem Zusammensein der vielen einfachen Wesen hervor. Das Zusammensein und Auseinandersein derselben stellen sich in unserer Intelligenz als Raumverhältnisse dar; die einzelnen Wesen erscheinen uns darum räumlich, obgleich sie es an sich nicht sind. Zur Entstehung der Materie gehören aber mindestens drei einfache Wesen. Zwei solche würden sich bei ihrem Zusammensein vollständig durchdringen, ein drittes nur kann dieses vollständige Zusammenfliessen in eins verhindern. Das Streben der vielen Einzelwesen nach vollständiger Durchdringung erscheint uns dann als Attraction, die gegenseitige Verhinderung als Repulsion, und das Resultat der unvollkommenen Durchdringung als die ausgedehnte Materie. Ein Atom oder ein materielles Element ist eine Verbindung von einfachen, realen Wesen, bei denen die Attraction und Repulsion ganz ausgeglichen ist [1]). Die Verschiedenheiten der Materien beruhen auf den Gegensätzen ihrer Elemente. Diese Gegensätze können verschiedene sein. Kommen Elemente zusammen, die sich verhalten wie Roth und Blau, oder wie zwei Töne, die um eine Octave entfernt sind, so müssen sie vollkommen zusammen sein. Aber von dieser Nothwendigkeit giebt es grössere und geringere Grade. Verhalten sich die Elemente wie Roth und Violett, so kommt es darauf an, in welchem Grade röthlich oder bläulich dieses Violett ist. Mit dem Gegensatz wechselt die Nothwendigkeit des vollkommenen Eindringens, daher die Attraction, mit dem nimmt sie auch bis zu Null ab. Ebenso wird sie Null bei disparaten Elementen. Zwischen Grün und Fis z. B. besteht kein Gegensatz, solche Elemente sind in demselben Orte, demselben Raume, und dennoch sind sie nicht für einander vorhanden.

---

[1]) Herbart wehrt sich, unserer Ansicht nach nicht mit vollkommenem Erfolge, gegen jeden Zusammenhang seiner Ansichten mit der Atomistik: „Wer hier“, sagt er, „von Atomistik eine Spur finden wollte, der würde sich sehr irren. Atome können einander nicht durchdringen; bei uns aber ist partiale Durchdringung der ganze Grund, warum wir uns auf die gemachte Fiction überhaupt einlassen. Und hier wird sich gerade die Ursache zeigen, warum bisher alle Versuche, aus Atomen oder Monaden die Materie zu erklären, fruchtlos bleiben mussten“. (Werke IV, 2. Thl., S. 213.)

Neben diesem Unterschiede der stärkeren und schwächeren Gegensätze kommt auch dann die Gleichheit und Ungleichheit derselben in Anschlag. Gleich ist ein Gegensatz, wenn gerade ein Element einer Art genügt, um eins von der anderen Art völlig zu stören, d. h. zu vollständiger Selbsterhaltung zu veranlassen. Wahrscheinlich aber ist jeder Gegensatz ungleich, d. h. es gehören mehrere Elemente *B* dazu, um ein Element *A* vollständig zu stören. Elemente von starken und gleichen, oder doch nahezu gleichen Gegensätzen bilden die starre Materie. Elemente von starkem aber sehr ungleichem Gegensatz, das Caloricum oder den Wärmestoff. Elemente von schwachem und nahezu gleichem Gegensatz das Electricum. Elemente von schwachem und sehr ungleichem Gegensatz den Aether. Die Lehre vom Wärmestoff, die wohl immer über die Bewegungstheorie der Wärme das Uebergewicht behaupten wird, hat auch viel Unbegreifliches, weil man die Ungereimtheit der ursprünglich bewegenden Kraft nicht einsehend, ihm eine ursprüngliche Expansionskraft zuschrieb, und weil man ihn für eine Materie nahm, was er doch nicht ist; denn es besteht ein ungeheurer Unterschied zwischen materiellen Molecülen, die allemal zusammengesetzt sind, und Elementen, welche einfach und darum unräumlich sind. Der Aether ist das Medium des Lichtes und der Schwere. „Anziehung in die Ferne, als Princip der Schwere, war bei dem grossen Newton eine blosse Redensart, um etwas Unbekanntes einstweilen zu beseitigen. Sie war bei Kant eine Kraft, jedoch mit dem Vorbehalt der Idealisten, diese Kraft sei nur Begriff und Nichts an sich. Sie ist bei den Nachsprechern, die weder Newton's noch Kant's Vorsicht begreifen, ein Vorurtheil, worauf die Gemächlichkeit ungern verzichtet.“ Der Aether geräth durch den Wechsel der Attraction, die er gegen die Massen der Weltkörper in allen Elementen ausübt, und durch die Repulsion, in welche er selbst durch sein eigenes Zusammentreffen in diesen Elementen versetzt wird, in eine oscillirende Bewegung, die sich bis in unendliche Entfernungen ausbreitet. Jeder Körper, darf man vermuthen, veranlasst den Aether zu einem besonderen System von Schwingungen; aber mehrere Körper zusammengenommen veranlassen in weiterer Ferne mehr und mehr ein solches System von Schwingungen,

als ob dasselbe von ihrem gemeinschaftlichen Schwerpunkt ausgehe. Daher treibt die Rückwirkung des schwingenden Aethers sie wirklich gegen ihren gemeinschaftlichen Schwerpunkt hin, und je näher sie demselben kommen, desto vollkommener passen die Schwingungen zu ihrer Lage.

Die höchst abstracte, alle physikalischen Begriffe nach weit zurückliegenden Gründen umdeutende Art der Herbart'schen Metaphysik hat sie den Physikern als eine jener müssigen philosophischen Speculationen erscheinen lassen, an welche man seine Zeit nicht zu verlieren braucht. In der That sind auch die Grundbestimmungen der einfachen Wesen, die Nothwendigkeit ihres Zusammenseins, ihre Selbsterhaltung dem gegenüber, die verschieden starken und verschiedenartigen Gegensätze der Elemente schwer fassbare und in mancher Hinsicht kaum bessere Vorstellungen, als die alten, welche durch sie ersetzt werden sollten. Dafür ist die Zerlegung der materiellen Atome in weitere Elemente keine absolut abzuweisende Construction, und der Versuch einer Erklärung aller Naturerscheinungen ohne besondere unbegreifliche, ursprüngliche Kräfte, ja ohne jede Veränderung der unwandelbaren Elemente, jedenfalls interessant und für die Atomistik wichtig. Die Actionen der Durchdringung, der Selbsterhaltung etc. aber haben vor den Grundkräften der damaligen Physik, denen sie allerdings von manchen Seiten recht stark ähnlich sehen, doch das voraus, dass sie eine unvermittelte Wirkung in die Ferne, eine eigentliche actio in distans nicht zulassen [1]). Herbart hat in der Physik keine Schule gemacht; den Kantianern und Schellingianern sind Herbartianer in der eigentlichen Physik nicht gegenüber zu stellen. Die Abneigung der damaligen Physiker gegen alle Naturphilosophie hinderte auch einen möglichen Erfolg der Herbart'schen Metaphysik.

Natürlich ist, dass trotzdem auch in dieser Periode einzelne geniale Naturforscher das Interesse für die Probleme von der Materie und der Kraft sich bewahrten und zu erkennen gaben. Berzelius z. B. sagt bei aller Verachtung der derzeitigen Naturphilosophie doch

---

[1]) Beachtungswerth erscheint auch, dass Kant und Herbart von verschiedenen Ausgangspunkten und unabhängig von einander dazu kommen, im Aether unaufhörliche und überall stattfindende Schwingungen zur Erklärung der Naturerscheinungen anzunehmen.

über eine von Seeber veröffentlichte Theorie der Materie [1]): „Ich führe diesen Versuch nur aus dem Grunde hier an, weil alle ähnlichen Speculationen Aufmerksamkeit verdienen, und weil, im Falle wir in diesem Gegenstande jemals das Richtige treffen, dies nicht die Frucht der Erfahrung, sondern nur die der Speculation werden kann". Auch Ampère, der berühmte Theoretiker des Elektromagnetismus, zeichnete sich vor seinen Collegen, den Pariser Akademikern, durch seine Begeisterung für die Philosophie aus und musste wohl deren Spott ertragen. Während berühmte Lehrer in ihren Vorträgen der Philosophie nicht bloss das Dasein, sondern sogar die Möglichkeit desselben bestritten, während man darauf aufmerksam machte, dass die Philosophen der Reihe nach ebenso Platon, Aristoteles, Descartes, wie Locke, Leibniz etc., die sich in Lehre und Methode widersprächen, als Orakel gepriesen, während man berühmten Philosophen spottend das Wort nachredete: „ich verachte Dich wie eine Thatsache"; währenddem schrieb Ampère an einen Freund: „Es bleibt mir kein Trost mehr auf Erden, da wir uns in Sachen der Metaphysik nicht mehr verstehen. . . . Ueber das Einzige, was mir am Herzen liegt, denkst Du anders als ich [2])". Wie lange und schwer sich Faraday mit dem Problem der Materie und der Kraft abmühte, welchen Scharfsinn und welche Mühe er zur Untersuchung dieser Aufgabe verwendete, welchen bedeutenden Nutzen er gerade aus diesen Bestrebungen zog, werden wir noch bei der speciellen Besprechung seiner Arbeiten sehen.

Eine ihrer ruhmvollsten Thaten gelang in dieser Periode der mathematischen Physik. Wie Newton aus der Annahme einer allgemeinen Gravitation alle Bewegungen der Himmelskörper mit äusserster Genauigkeit berechnen, und sogar für die Vergangenheit und Zukunft so gut als für die Gegenwart feststellen konnte; so

---

[1]) L. A. Seeber, Versuche zur Erklärung des inneren Baues der festen Körper, Gilbert's Ann. LXXVI, S. 229, 1824. Berzelius, Bericht über die Fortschritte der Physik und Chemie VI, S. 75, 1826.

[2]) Arago behandelt in seiner Biographie Ampère's (Arago's sämmtliche Werke II, S. 32 u. 58) dessen philosophische Bestrebungen mit leisem spöttischen Humor, dem gegenüber er, unserer Ansicht nach, die Erfolge derselben nicht genug hervorhebt. Ampère's Verdienste um die theoretische Atomistik z. B. schätzt man heutzutage doch viel höher, als Arago damals geahnt zu haben scheint. (Vergl. Kopp, Entwickelung der Chemie, München 1873, S. 354 bis 357 u. a. O.).

gelang es jetzt Fresnel, aus der einzigen Hypothese der transversalen Aetherschwingungen alle die verwickelten optischen Erscheinungen, der Doppelbrechung, der Polarisation zu deduciren und sogar neue Entdeckungen vorherzusagen. Er zeigte damit wieder einmal nicht nur die gewaltige Macht der Mathematik, die von manchen Experimentalphysikern schon in Frage gestellt war, sondern begründete aufs Neue ihren Ruhm als der sichersten Erkenntnissmethode auch in der Naturwissenschaft; er gab endlich die Veranlassung zu einer erneuten Untersuchung der Elasticität der Körper, zu einem weiteren Fortschritte in der Molecularmechanik von mathematischer Seite aus.

In dem mechanisch-mathematischen Zweige der Physik bedingte das Altern und Absterben der grossen Physico-Mathematiker Laplace, Lagrange, Poisson u. A. ein Nachlassen der schnellen Entwickelung. Die grossen deutschen Mathematiker, mit Gauss an der Spitze, waren ausschliesslicher der reinen Mathematik und der Astromechanik zugewandt und hatten darum weniger allgemeinen Einfluss in der Physik als jene. Einige neu eintretende principielle Fortschritte, wie die Anwendung synthetischer Methoden in der Mechanik durch Poinsot und Möbius, die Verwerthung des Begriffs der Arbeit durch Poncelet und Coriolis und die Entwickelung des Begriffs des Potentials durch Gauss, Green und Hamilton wurden erst in den folgenden Perioden allgemeiner und richtiger gewürdigt.

Aus der Experimentalphysik leuchtet vor Allem die Entdeckung des Elektromagnetismus hervor. Kaum eine andere physikalische Entdeckung hat so viel Enthusiasmus, so viel unmittelbare Bestätigungen, so viel fördernde Arbeiten direct unter allen Culturnationen hervorgerufen, als jene Entdeckung Oersted's; keine andere aber hat so schnell Früchte getragen und so stark verändernd auf das ganze Aussehen der Physik gewirkt als diese. Der Beobachtung der Ablenkung der Magnetnadel folgte sogleich die Beobachtung aller Erscheinungen, welche aus dem Verhalten eines Stromes als eines Magneten folgen, und folgte auch direct die noch heute gültige Theorie des Magnetismus. In kurzer Zeit schlossen sich an die Entdeckung des Rotationsmagnetismus die der gal-

vanischen Induction, des Thermomagnetismus, die Beobachtung der Drehung der Polarisationsebene des Lichtes durch den Magneten und der Wirkung des Magnetismus auf alle Substanzen. Auf die elektromagnetischen Erscheinungen stützte sich das Ohm'sche Gesetz, die Grundlage für die ganze messende Elektricitätstheorie, die Construction des absoluten Maasssystems durch Gauss, endlich die neue Art der Kräfteanschauung, die Faraday sich ausbildete und die später durch Maxwell zu grösserer Geltung gekommen ist. Mit Hülfe elektromagnetischer Maschinen erhielt man zuerst constante Quellen der Elektricität, mit Hülfe des Elektromagnetismus versuchte man zuerst die Elektricität als Quelle mechanischer Kraft zu gebrauchen, und selbst die ersten ausgeführten Telegraphen von Gauss und Weber arbeiteten mit elektromagnetisch inducirten Strömen. Die Wirkungen des Elektromagnetismus waren für sich allein genügend, das alte Gebäude der Imponderabilien zu stürzen; der neue Begriff der Kraftverwandlung, der mit dem Begriff unwandelbarer Imponderabilien unvereinbar war, erhielt durch den Elektromagnetismus seine erste Grundlage und giebt immer noch für den Begriff die allgemeinsten Beispiele. In der That erscheint auch mit der vollständigen qualitativen Ausbildung des Elektromagnetismus der Begriff der Kraftverwandlung vollkommen entwickelt und anerkannt, und es folgt fast direct die quantitative Untersuchung der bekannten Kräftetransformationen.

Wir hätten deshalb für diese Periode der Physik ganz gut den Namen einer Periode des Elektromagnetismus schlechthin wählen können, wenn wir nicht hätten andeuten wollen, dass auch andere Zweige der Physik zum Stürzen des Alten oder zur Ausbildung der neuen Vorstellungen beigetragen haben. Für das Letztere ist neben der Undulationstheorie des Lichtes in erster Linie die Theorie der Wärme zu nennen. Die mathematischen Entwickelungen Fourier's, seine genauen Definitionen der Wärmeeinheiten, die Untersuchungen über die Elasticität der Gase und Luftarten bei verschiedenen Temperaturen befähigten Carnot, nicht bloss die Umwandlung von Wärme in mechanische Kraft, sondern auch die Constanz des

Umwandlungsverhältnisses festzustellen. Leider hinderte die Vorstellung von einem Wärmegefälle den Letzteren an einer weiteren Ausbildung der neuen Anschauung. Dafür bewies Melloni, mit Hülfe neuer elektrothermischer und elektromagnetischer Apparate, dass die Wärmestrahlen in ihren Eigenschaften den Lichtstrahlen gänzlich entsprechen, und half so seinerseits die Grundlage zu einer neuen Anschauung von der Wärme legen.

Etwas weiter ab vom allgemeinen Wege der damaligen Physik lagen die Probleme der Akustik. Doch verpflichteten die Gebrüder Weber sich alle Physiker zu hohem Dank, als sie in ihrer Wellenlehre zeigten, wie man die Eigenschaften der nun für Optik und Wärmelehre immer wichtiger werdenden Erscheinungen der Undulationen klar beschreiben und begreifen könnte. Auch verband die Entdeckung der Interferenz des Schalles noch einmal die Erscheinungen der Interferenz mit der Vorstellung von Wellenbewegungen und wurde so noch einmal eine Stütze für die Undulationstheorie des Lichtes.

Eine Benutzung akustischer Erscheinungen zur Erklärung gewisser Spectralerscheinungen, wie sie in neuester Zeit ausgeführt worden ist, wollte damals nicht gelingen, ja wurde, trotzdem sie keineswegs fern lag, nicht einmal geplant. Die Entdeckung der Fraunhofer'schen Linien im Sonnenspectrum, wie die der hellen Linien in den Spectren künstlicher Flammen, wurde zwar einige Zeit mit Eifer verfolgt, blieb aber bald unbeachtet und fiel der Vergessenheit anheim, weil die Erscheinungen räthselhaft und ohne Verbindung mit anderen verwandten Erscheinungen unfruchtbar blieben. Ihr Schicksal giebt ein lehrreiches Beispiel für die Unwahrheit der Behauptung, dass nur die Experimentalphysik und sie allein, unabhängig von anderen methodischen Factoren, den Fortschritt der Wissenschaften bewirken könne. Das Schicksal jener Spectralbeobachtungen zeigt vielmehr für jeden Unbefangenen deutlich, dass selbst die Anhäufung neuer experimenteller Erfahrungen bald zum Stillstand kommt, wenn nicht leitende und verbindende, das Gemeinsame, das Gesetzmässige, das Wesen der Erscheinungen erfassende Ideen die Ergebnisse der Beobachtung befruchten und ihnen erst wissenschaftlichen Charakter verleihen.

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

Am 29. December 1826, dem hundertjährigen Stiftungstage der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften zu Petersburg, stellte dieselbe folgende Preisaufgabe: „Die Natur giebt in der **Physik des Lichtes** folgende vier Aufgaben zu lösen, deren Schwierigkeiten keinem Physiker entgangen sind: die Beugung des Lichtes, die Farbenringe, die Polarisation und die Doppelbrechung. . . . Wir erläutern diese Phänomene nur mathematisch; die beiden ersten, indem wir dem Lichte eine verborgene Eigenschaft (die der Anwandlungen) beilegen, die keineswegs aus einfachen Erscheinungen abstrahirt ist; die beiden letzteren, indem wir sie auf anziehende und abstossende Kräfte zurückführen, die von einer mathematischen Achse, einer geometrischen Linie ausgeübt werden. . . . Young hat versucht, die Ursachen der Beugung und der Farbenringe auf einfache Bewegungsgesetze zu reduciren, indem er auf das Undulationssystem zurückgriff, welches von Descartes ersonnen [1]), von Huyghens bearbeitet, von Euler vervollständigt, aber seitdem verlassen worden ist. Die Physiker würden sich gern seinen Ausführungen anschliessen, wenn die folgenden Gründe nicht davon abhielten. Die Lichtstrahlen, welche durch eine enge Oeffnung in ein dunkles Zimmer fallen, pflanzen sich in diesem nur in ihrer ursprünglichen Richtung und nicht, wie die Töne, nach allen Seiten hin fort. Als reguläre Fortpflanzungsart hat Young für das Licht nur die geradlinige angenommen, doch musste er, oder vielmehr Fresnel an seiner Statt, zur Erklärung gewisser Beugungsphänomene auch die zweite Art der Fortpflanzung zulassen, welche beide Annahmen sich doch entschieden widersprechen; denn das Licht kann nicht in einigen Fällen seine Richtung halten und in anderen sich nach allen Richtungen hin zerstreuen. Ferner muss die Undulationstheorie voraussetzen, dass das Licht in dem dichteren Mittel sich langsamer fortpflanzt, als in dem dünneren, während doch Newton durch die schärfsten Demonstrationen das Umgekehrte bewiesen hat. Endlich aber muss die Undulationstheorie, um die chemischen Wirkungen des Lichtes zu erklären, annehmen, dass nur die vibrirende Lichtmaterie, der vibrirende Aether, chemische Wirkungen ausübt, während doch z. B. die Luft, wie jede andere Substanz, auch in der Ruhe und nicht bloss tönend ihre chemischen Verwandtschaften äussert. Die Akademie schlägt also folgende drei Probleme zur Lösung vor: Entweder mit Hülfe des Emanationssystems und der Anwandlungen die physischen Ursachen der obigen vier Erscheinungen zu finden und sicher festzustellen, oder die Undulationstheorie des Lichtes von allen Einwänden, welche man ihr mit anscheinendem Recht gemacht hat, zu befreien und dieselbe auch auf die Polarisation des Lichtes und die Doppelbrechung anzuwenden; oder das chemische System der Optik durch mathematische Demonstrationen und

---

[1]) Das ist falsch; Descartes' Theorie des Lichtes ist keine Undulationstheorie. Vergl. Bd. II dieses Werkes, S. 104.

zwingende Versuche zu einer Theorie zu erheben, welche alle Erscheinungen der Beugung, der Farbenringe, der Polarisation wie der Doppelbrechung umfasst." Diese Preisaufgabe ist charakteristisch für die Stimmung der Optiker der damaligen Zeit, mehr charakteristisch vielleicht, als man von einer Akademie hätte erwarten sollen. Die Aufgabe kam ein gut Theil später, als sie hätte kommen dürfen, in Wirklichkeit war sie schon von den Ereignissen überholt und schon gelöst und entschieden, ehe sie nur gestellt wurde [1]).

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

Die Emanationstheorie hatte mit Biot ihre letzten Trümpfe ausgespielt; sie hatte durch diesen die vier von der Akademie erwähnten Probleme mit Hülfe der erwähnten Annahmen gelöst; weiteres aber war von ihr kaum zu erwarten. Die von der Akademie geforderte Zurückführung aller Erscheinungen auf eine physikalische Ursache lag nicht in der Natur der Emanationstheorie, die ausser der Grundhypothese, dass das Licht eine Emanation der leuchtenden Körper, unbedingt noch anderer aus dieser nicht fliessender Nebenhypothesen bedurfte und gerade in dieser leichten Aufnahmefähigkeit von zusätzlichen Annahmen ihre besondere Stärke hatte.

Die chemische Theorie des Lichtes, deren Ausbildung die Akademie an dritter Stelle den Physikern vorschlug, war von G. F. Parrot [2]) in dem zweiten Bande seiner „Uebersicht des Systems der theoretischen Physik" (1809 bis 1811, zwei Bände, Dorpat) aufgestellt worden. Er nahm vor Allem zur Erklärung der chemischen Wirksamkeit des Lichtes und der Verschiedenheit der Farben an, dass es verschiedene Lichtstoffe gäbe, deren jeder den Eindruck einer bestimmten Farbe hervorbringe. Diese Lichtstoffe, welche in ihrer Gesammtheit den Eindruck von weissem Lichte geben, sind wirkliche, wenn auch unwägbare, aber vom Wärmestoff wohl unterschiedene Materien, die, mit bestimmten chemischen Affinitäten begabt, von den Körpern oder

---

[1]) Die Commission der Akademie, welche zur Beurtheilung der Preisarbeiten niedergesetzt war, bestand aus den Akademikern Collins, Parrot und Kupffer. Sie fand von den eingelaufenen sechs Abhandlungen keine würdig de l'attention de l'academie, und die letztere zog danach den ausgesetzten Preis zurück.

[2]) Georg Friedrich Parrot (1767 Mömpelgard — 1852 Helsingfors, Professor der Physik an der Universität Dorpat von 1800 bis 1826, dann Mitglied der Akademie der Wissenschaften in Petersburg), nahm für seine Naturerklärung eine besondere Naturkraft, die Affinität erster Art, eine Anziehung der Stoffe zu einander an, vermöge welcher dieselben sich freiwillig mischen, ohne ihre Grundeigenschaften zu verlieren. Diese Affinität, welche alle ponderablen wie imponderablen Stoffe beherrscht, hat nach Parrot die allgemeinste Wirksamkeit. „Möge der Physiker diesen hohen Standpunkt, der die Chemie mit der Mechanik so innig verbindet, der in chemischen Phänomenen das mechanische Gesetz so klar aufdeckt, gehörig beherzigen." (Gilbert's Ann. LI, S. 321, 1815.)

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

besser von einem in den Körpern enthaltenen Aether, verschiedene Anziehungen und damit auch bei ihrem Durchgange durch die Körper verschiedene Brechungen erleiden und auch je nach ihren besonderen chemischen Verwandtschaften die Körper in verschiedener Weise verändern. Diese Theorie, welche Parrot auch zur Erklärung der Beugung und der Farbenringe anwandte, der aber die Verbindung mit der Doppelbrechung und der Polarisation noch fehlte[1]), hat ihren zureichenden Grund in dem seit Newton üblichen Verfahren: alle besonderen physikalischen Erscheinungen auch durch besondere mit geeigneten Elementarkräften versehene Materien zu erklären, wurde aber damals kaum noch als einer weiteren Ausbildung fähig angenommen und war schon um die Zeit, als die Akademie ihre Preisaufgabe stellte, als hoffnungslos aufgegeben[2]).

So blieb also für die von der Akademie angedeutete Fortentwickelung der theoretischen Optik nur die Undulationstheorie übrig, die auch diese Entwickelung schon weiter gefördert hatte, als die Akademie damals noch gewusst zu haben scheint. Denn die geforderte Anwendung der Undulationstheorie auf die Polarisation und Doppelbrechung des Lichtes hatte Fresnel schon zu jener Zeit in höchst genialer Weise bewerkstelligt, und mit der Befreiung der Theorie von den erhobenen Einwänden war man eifrig und theilweise glücklich beschäftigt. Fresnel[3]) begann seine optischen Untersuchungen ähnlich wie Young, aber im Anfang wenigstens noch unbekannt mit dessen Arbeiten und also unabhängig von jenem, mit der Beobachtung der Beugung des Lichtes. Er über-

---

[1]) In Gilbert's Annalen (LI, S. 321, 1815), wo Parrot seine Farbentheorie noch einmal in drei optischen Abhandlungen vertheidigt, sagt er: „Ich spreche von der doppelten Brechung nicht, obgleich der Schlüssel zu ihrer Erklärung in derselben Theorie liegt, weil ich noch keine eigenen Versuche darüber angestellt habe, und bis jetzt die des Herrn Malus nur unvollkommen aus Auszügen kenne."

[2]) Brandes z. B. beendet seine Besprechung der Parrot'schen Lichttheorie in Gehler's physikalischem Wörterbuch (VI, S. 372, 1831) mit den Worten: „Ich darf wohl gestehen, dass ich die Hoffnung nicht hege, dass aus dieser Theorie eine mit strenger Genauigkeit den verwickelten Erscheinungen des Lichtes entsprechende Erklärung hervorgehen könne".

[3]) Augustin Jean Fresnel wurde am 10. Mai 1788 zu Broglie in der Normandie geboren und (1801) auf der Centralschule zu Caen, auf der polytechnischen Schule (1804), wie auf der Schule für Ingenieure (école des ponts-et-chaussées) ausgebildet. Bis 1814 war er als Ingenieur in den Departements Vendée, Drôme etc. beschäftigt; 1815 setzte ihn Napoleon, weil er eifriger Royalist war, ab. Nach der zweiten Rückkehr der Bourbonen wurde er Ingenieur in Paris, später Examinator an der polytechnischen Schule und 1823 auch Mitglied der Akademie. Fresnel, der immer sehr zarter Gesundheit gewesen, bekam 1824 einen Blutsturz, der ihn zu gänzlicher wissenschaftlicher Unthätigkeit verdammte; am 14. Juli 1827 starb er in Ville-d'Avray bei Paris. Kurz vor seinem Tode erfreute ihn noch die Royal Society durch die Verleihung der Rumford-Medaille.

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

reichte seine erste Abhandlung über dieses Thema der französischen Akademie im Jahre 1815[1]) und gab noch in diesem Jahre wie in den folgenden mehrere Ergänzungen hinzu. Die vollständige vollendete Arbeit: Mémoire sur la diffraction de la lumière, konnte er am 29. Juli 1818 der Akademie vorlegen. Mit der Berichterstattung über dieselbe wurden Arago und Poinsot betraut. Der Erstere besonders griff die neuen Ideen mit Eifer auf, machte auf Young's System aufmerksam, zeigte die fundamentalen Schwächen von Biot's optischen Untersuchungen und arbeitete fortan gemeinschaftlich mit Fresnel an der Vervollkommnung der Undulationstheorie. Seinem Einflusse war es wohl hauptsächlich zuzuschreiben, dass im Jahre 1819 das französische Institut die Arbeit Fresnel's mit dem Preise krönte. Gedruckt erschien dieselbe in den Schriften der Akademie erst im Jahre 1826[2]), doch hatte Fresnel einzelne Aufsätze schon vorher in den Annales de chimie et de physique (Bd. I, 1816 und Bd. XI, 1819) veröffentlicht.

Fresnel ging mit diesen Arbeiten nach zwei Seiten hin über Young hinaus; er leitete die Interferenzerscheinungen nicht wie Young aus dem Zusammenwirken zweier Lichtstrahlen, sondern aus der Combination der Elementarwellen ab, die, von allen Punkten der leuchtenden Fläche ausgehend, in dem beobachteten Punkte zusammentreffen, und er zeigte, dass nicht nur gebeugtes Licht, sondern auch gewöhnliches, von Spiegeln reflectirtes Licht der Interferenz fähig sei. Young hatte die Beugungsstreifen, welche den geometrischen Schatten eines Körpers, der von einer sehr wenig ausgedehnten Lichtquelle beleuchtet wird, umsäumen, aus der Interferenz eines von dem Rande des Körpers reflectirten Lichtstrahles und eines directen Lichtstrahles abgeleitet. Fresnel bekennt, dass er bei seinen ersten Arbeiten dasselbe gedacht hat, fährt aber dann fort[3]): „Wäre dieses aber gegründet, so müsste die Schneide eines Rasirmessers, welche der Reflexion eine so geringe Fläche darbietet, die äusseren Streifen viel schwächer erzeugen, als der viel Licht zurückwerfende Rücken eines Rasirmessers. Allein man bemerkt keinen Unterschied in der Intensität der von beiden erzeugten Streifen". Die äusseren Beugungsstreifen sind generell diesel-

[1]) Am 28. December 1814 noch schrieb Fresnel aus Lyon: „Ich weiss nicht, was man unter Polarisation des Lichtes versteht; ich lasse meinen Onkel Mérimée bitten, mir die Werke, aus denen ich mich darüber unterrichten kann, zukommen zu lassen". (Arago's sämmtl. Werke I, S. 95.)

[2]) Mém. de l'Acad. des sciences V, 1826. Eine mehr populäre Darstellung seiner Untersuchungen über die Interferenz und die Beugung des Lichtes gab Fresnel selbst in dem Artikel Lumière im Supplément à la traduction de la cinquième édition du Système de chimie de Th. Thomson par Riffaut (Paris 1822). Eine Uebersetzung dieses Artikels findet sich in Pogg. Ann. III und V; auch die folgenden Arbeiten Fresnel's sind meist in diesen Annalen XII, XIX, XXI, XXII und XXIII übersetzt.

[3]) Pogg. Ann. d. Phys. III, S. 125, 1824.

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

ben mit denjenigen Farbenstreifen, welche entstehen, wenn man in den Weg des Lichtstrahles einen Schirm mit sehr enger Oeffnung stellt. Young erklärte auch diese durch die Interferenz der direct durch die Oeffnung gegangenen Strahlen mit den an den Rändern derselben reflectirten. Fresnel aber zeigte durch viele Versuche, dass auch hier die Erscheinung von einer Reflexion des Lichtes nicht abhängt. Er liess ein Lichtbündel zwischen zwei sehr genäherten Stahlplatten mit parallelen Rändern hindurchgehen, die zur Hälfte zugeschärft, zur Hälfte abgerundet waren und einander so gegenüber standen, dass die eine Platte den abgerundeten Rand oben, die andere unten hatte. Trotz der Verschiedenheit der Ränder war aber in den Beugungsstreifen weder ein Bruch, noch eine Biegung wahrzunehmen. Oder er bedeckte eine unbelegte Spiegelglasplatte mit Tusche und radirte mit dem Federmesser eine sehr schmale rechteckige Oeffnung heraus. Diese Oeffnung gab ganz dasselbe Beugungsbild, wie eine gleich breite Oeffnung, die durch zwei massive Kupfercylinder begrenzt war [1]). Danach blieb Fresnel nur übrig, die Beugungsstreifen durch die Interferenz alles Lichtes, welches durch die Schirmöffnung hindurchgeht, zu erklären. Er griff zu dem alten Huyghens'schen Princip zurück, alle Punkte der Schirmöffnung, durch welche das Licht hindurchgeht, als Mittelpunkte neuer Lichtwellen anzusehen, die nun weiter im Dunkeln sich ausbreiten. Jede Stelle des Auffangeschirmes wird von all diesen Elementarwellen getroffen, aber da die Entfernung derselben von den verschiedenen Punkten der Lichtöffnung verschieden ist, in verschiedenem Schwingungszustande oder in verschiedener Phase. Die Erleuchtung jedes Punktes des Auffangeschirmes ist also das Resultat unendlich vieler Beleuchtungen, die sich theils addiren, theils subtrahiren, also an manchen Stellen grössere, an anderen geringere Erleuchtung bewirken. Die Ableitung der Grösse dieser Erleuchtung aus der Grundhypothese von der Interferenz unendlich vieler Elementarwellen war eine rein mathematische, aber keine leichte Aufgabe. Fresnel musste zuerst durch eine Formel den Bewegungszustand eines jeden schwingenden Theilchens in einer Welle geben, er musste zeigen, wie sich dieser Bewegungszustand mit der Entfernung vom Mittelpunkte der Welle ändert. Dann konnte er die Bewegungen bestimmen, welche von allen Punkten der leuchtenden Fläche auf einen bestimmten Punkt des Schirmes auftreffen. Danach aber blieb noch die schwierigste Aufgabe, nämlich alle diese Ausdrücke für die unendlich vielen Bewegungen zu summiren oder die Integralformel der für jeden Schirmpunkt resultirenden Lichtstärke zu geben. Fresnel überwand auch diese nicht geringen mathematischen Schwierigkeiten, und die Resultate dieser Integralformeln, welche er in seinem Werke über die Diffraction des Lichtes aufstellte,

---

[1]) Pogg. Ann. der Physik III, S. 128, 1824.

stimmten so vollständig mit den Erscheinungen der Beugungen überein, dass selbst sein Gegner Biot gestand: „Von diesem Gesichtspunkte ausgehend vermochte Fresnel alle Fälle der Beugung mit ausnehmender Schärfe unter einen Gesichtspunkt zu fassen und unter Formeln zu bringen, durch welche für jetzt und immer ihre wechselseitige Abhängigkeit festgestellt wird". Gegen die Formeln also war nichts zu machen, die waren durch ihre Uebereinstimmung mit der Erfahrung gesichert; doch meinte Biot nicht verschweigen zu dürfen, dass ihre theoretische Ableitung aus dem Princip der Elementarwellen von „Mathematikern ersten Ranges, namentlich von Poisson" (Annales de chimie et de physique, 1823), Widerspruch gefunden habe [1]). Die mathematische Ableitung der Fresnel'schen Integrale ist dann später auch vielfach vereinfacht und verbessert worden, das principielle Fundament der Deduction aus dem Princip der Interferenz der Elementarwellen dagegen ist trotz der Einwendungen geblieben.

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

Durch die Vereinigung des Princips der Elementarwellen mit dem Princip der Interferenz klärte Fresnel auch den scheinbaren Widerspruch zwischen der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes und der Beugung desselben auf. Auch in den Schatten eines Körpers pflanzen sich allerdings die Elementarwellen fort, aber sie löschen sich dort bis auf einige Lichtstreifen an der Grenze des Schattens durch die Interferenz gegenseitig aus.

Die bisher erwähnten Erscheinungen der Interferenz hatte auch die Emissionstheorie des Lichtes, wenn auch nur durch besondere Annahmen erklärt. Fresnel brachte nun neue Phänomene, durch welche die Emissionstheorie unbedingt zu einer Anerkennung des Interferenzprincips genöthigt und gezwungen wurde, auch dieses ihr ganz fremde Princip in den Kreis ihrer Hypothesen aufzunehmen. Dies geschah durch den bekannten Fresnel'schen Versuch [2]), bei welchem die von zwei sehr wenig zu einander geneigten Spiegeln reflectirten Lichtstrahlen direct zur Interferenz gebracht werden. Hier konnte von Anwandlungen der leichteren Transmission oder Reflexion, oder von der beugenden Wirkung anziehender und abstossender Kräfte absolut nicht die Rede sein. Die Emissionstheoretiker konnten sich nur dadurch retten, dass sie die Interferenz nicht für ein objectives, sondern für ein subjectives Phänomen erklärten, entstehend dadurch, dass auf der Netzhaut unseres Auges gewisse Lichtstrahlen sich verstärkten und andere in ihren Wirkungen aufhöben [3]). Merkwürdig blieb dabei nur, dass die Entfernungen der von Fresnel an seinen Spiegeln beobachteten Interferenz-

---

1) Biot, Lehrbuch der Experimentalphysik IV, S. 95 bis 96.

2) Poggendorff's Ann. III, S. 104 bis 116, 1824.

3) Biot, Lehrbuch der Experimentalphysik IV, S. 84.

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

streifen ganz mit den Entfernungen der Farbenringe dünner Blättchen oder der Beugungsstreifen übereinstimmten. Damit wurde doch mehr als wahrscheinlich, dass beide Phänomene aus derselben Quelle, nämlich einer objectiven, nicht subjectiven Interferenz, entsprangen, und danach mussten auch die Newton'schen Anwandlungen bei der Erklärung der Farben dünner Blättchen, wie der Beugungserscheinungen überflüssig werden.

Von Fresnel rühren eine Menge Vorschriften für die Veranstaltung von Beugungsversuchen her, welche dieselben überhaupt, vor Allem aber ihre Messung sehr erleichtern. Er setzte in die Lichtöffnung des verfinsterten Zimmers zur Concentrirung des einfallenden Lichtes statt der üblichen, mit einer Nadel durchbohrten Zinnfolie oder Pappe, eine Glaslinse mit sehr kurzer Brennweite ein. Zur bequemeren Beobachtung fing er zuerst die Beugungsbilder auf einer mattgeschliffenen Glastafel auf und betrachtete dieselben durch eine mit einem Mikrometer versehene Lupe von der hinteren Fläche der Tafel her. Schliesslich bemerkte er, dass er ohne sonstige Lagenveränderung, aber mit bedeutend vergrösserter Helligkeit, die Streifen auch ohne Glastafel direct mit der Lupe, oder, wenn keine Messungen beabsichtigt wurden, mit dem unbewaffneten Auge auffangen konnte [1]). Trotzdem führte er wunderbarer Weise die Messungen der Entfernungen der Beugungsstreifen nur für rothes Licht, wie es gewisse Kirchenfenster durchlassen, durch und berechnete die Wellenlängen der einzelnen Farben wieder, wie schon Young es gethan, aus Newton's Messungen. Wenigstens stimmte Fresnel's directe Berechnung der Wellenlänge des rothen Lichtes zu 0,000 638 mm recht gut mit den aus Newton's Messungen erhaltenem Werthe.

Fresnel's Arbeit über die Diffraction des Lichtes zeigte die Macht der Undulationstheorie in diesem Theile der Optik unzweifelhaft; trotzdem darf man nicht verkennen, wie es von Physikern ohne eigentliche historische Bildung wohl manchmal geschieht, dass die Emissionstheorie noch immer im Vortheil, und dass Biot's und Anderer Gegnerschaft gegen dieselbe keineswegs so unsinnig war, als man jetzt wohl manchmal annimmt. Die Emissionstheorie gab für die zuletzt erwähnten optischen Erscheinungen unläugbar schwächere und gezwungenere Erklärungen als die Undulationstheorie, aber sie gab doch welche. Dagegen war die letztere auf dem Gebiete der Polarisation des Lichtes, das Biot mit Hülfe der ersteren so erfolgreich bearbeitet, noch gänzlich unfruchtbar und machtlos gewesen. Fresnel und sein überzeugter Anhänger und Mitarbeiter Arago mussten also vor Allem, ehe nur ein allgemeiner Erfolg für sie in Aussicht sein konnte, auch dieses Gebiet für die Undulationstheorie erobern.

---

[1]) Pogg. Ann. III, S. 97 bis 104, 1824.

Undulationstheorie des Lichtes c. 1815 bis c. 1830.

Die Entdeckung der chromatischen Polarisation durch Arago und noch mehr die der farbigen Ringe, welche man durch dünne Krystallblättchen im Polarisationsapparat beobachtete, liessen darauf schliessen, dass auch bei diesen Polarisationserscheinungen Interferenzen der Lichtstrahlen eintreten könnten. Es war also natürlich, dass Fresnel und Arago sich direct nach ihrer Annahme der Undulationstheorie zur Untersuchung der Interferenzfähigkeit des polarisirten Lichtes wandten, um womöglich von dieser Seite zur Erklärung der Polarisation des Lichtes durch ihre Lichttheorie zu kommen. Fresnel hatte diese Untersuchungen schon 1816 begonnen und die Resultate auch noch in demselben Jahre der Akademie vorgelegt; die vollständige Abhandlung, die Fresnel und Arago gemeinschaftlich bearbeiteten, erschien erst im Jahre 1819 in den Annales de chimie et de physique. Fresnel prüfte zuerst die Hypothese Young's, nach der die Farbenringe des polarisirten Lichtes von einer Interferenz des ausserordentlichen und des ordentlichen Strahles herrühren sollten, kam aber zu einem durchaus negativen Resultat; die beiden Strahlen waren unter keinen Umständen zur Interferenz zu bringen. Um nun das Problem allgemeiner fassen zu können, liess man, nach dem Vorschlag Arago's, das Licht eines Lichtpunktes auf eine Kupferplatte fallen, in der sich zwei sehr schmale Oeffnungen nahe bei einander befanden, so dass die durchgegangenen Strahlen interferiren mussten. Zur Polarisation derselben wurde hinter jede Oeffnung ein Satz aus Glimmerblättchen so gesteckt, dass eine vollständige Polarisation erfolgte. Da diese übrigens vollständig gleichen Glimmersätze um die Achse der Lichtstrahlen mit immer gleicher Neigung gegen dieselbe gedreht werden konnten, so vermochte man nun den Polarisationsebenen der auf ihre Interferenz zu untersuchenden Strahlen jede mögliche Neigung gegen einander zu geben. Fresnel und Arago fanden auf diese Weise die fundamentalen Sätze: 1) Zwei in derselben Richtung polarisirte Lichtstrahlen interferiren wie gewöhnliche Strahlen; 2) zwei rechtwinkelig polarisirte Strahlen interferiren unter keinen Umständen; 3) zwei rechtwinkelig polarisirte Strahlen, die von einem polarisirten Lichtstrahle herrühren, interferiren, wenn sie auf dieselbe Polarisationsebene gebracht werden; 4) zwei rechtwinkelig polarisirte Strahlen, die von natürlichem Lichte herrühren, interferiren auch unter diesen Umständen nicht. Aus den beiden letzten Sätzen erklärten sich direct ohne Zuhülfenahme einer weiteren Hypothese die Erscheinungen der chromatischen Polarisation; sie bildeten die nothwendige Ergänzung zu Young's Annahme, dass die betreffenden Farben durch Interferenz der verschieden gebrochenen Strahlen entstünden. Die beiden aus einem dünnen Blättchen eines doppeltbrechenden Krystalls austretenden Lichtstrahlen interferiren also nur, wenn das auf das Blättchen auffallende Licht polarisirt ist (das bedingt die Anwendung des Polari-

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

sateurs) und wenn die beiden ausgetretenen Strahlen auf dieselbe Polarisationsebene gebracht werden (das macht die Anwendung eines Analyseurs nöthig).

Der wichtigste dieser vier Sätze war indessen der zweite; denn aus ihm folgt unfehlbar, dass die Schwingungen von rechtwinkelig polarisirten Lichtstrahlen nicht in derselben Richtung erfolgen können, denn in diesem Falle müssten sich die Bewegungen addiren oder subtrahiren, verstärken oder auslöschen können. Sollen in polarisirtem Lichte die Schwingungen, trotzdem die Lichtstrahlen parallel laufen, doch nicht in gleicher Richtung erfolgen, so darf auch die Richtung der Schwingungen nicht in der Richtung des Strahles, in der Fortpflanzungsrichtung liegen, und die Undulationen des Lichtes können unmöglich longitudinale sein. Die so mit Nothwendigkeit sich ergebende Annahme transversaler Schwingungen des Lichtes wagte Young direct nach Veröffentlichung der ersten Versuche Fresnel's in einem Briefe an Arago vom 12. Jan. 1817. Den meisten Physikern aber, und vor Allen den mathematischen, wie Laplace, Poisson u. A., erschien die Hypothese von Schwingungen in einem homogenen Mittel, die nicht in der Fortpflanzungsrichtung der Wellen, sondern in einer gegen die letztere geneigten oder gar senkrechten Richtung geschähen, als eine Absurdität[1]. Auch Fresnel mochte diese Annahme nicht eher als eine fundamentale seinem System der Undulationstheorie einverleiben, als bis er die Fruchtbarkeit derselben zur Erklärung der Polarisationserscheinungen genügend aufzeigen und ihre mechanische Möglichkeit beweisen konnte[2]. Das geschah 1821 in seiner Abhandlung Considérations mécaniques sur la polarisation de la lumière (Ann. de chim. et de phys. (2) XVII, p. 179) und bald darauf vollständiger in dem Mémoire sur la double réfraction. Dies letztere wurde ebenfalls noch im Jahre 1821 der Pariser Akademie übergeben und im Jahre 1822 durch eine Commission, bestehend aus Arago, Ampère und Fourier ausgezeichnet,

---

[1] Vergl. Verdet, Wellentheorie des Lichtes, übersetzt von Exner, I, S. 349, Braunschweig 1883.

[2] Fresnel sagt über die Hypothese von der Transversalität der Lichtschwingungen: „Allein diese Hypothese war den hergebrachten Ideen über die Natur der Vibrationen elastischer Flüssigkeiten so entgegen, dass ich lange anstand, sie anzunehmen; und selbst als die Gesammtheit der Thatsachen und wiederholtes Nachdenken mich überzeugt hatten, dass sie nothwendig sei zur Erklärung der optischen Erscheinungen, suchte ich, bevor ich sie dem Urtheile der Physiker unterwarf, mich zu versichern, dass sie den Grundsätzen der Mechanik nicht widerspreche. Dreister in seinen Vermuthungen und weniger Vertrauen in die Ansichten der Mathematiker setzend, hat Herr Young diese Hypothese vor mir bekannt gemacht (obgleich er sie vielleicht später entdeckte)". (Pogg. Ann. XXIII, S. 380, 1831.)

erschien aber erst 1827 im VII. Bande der Memoiren dieser Akademie [1]. Das Urtheil der Commission über die Transversalität der Lichtschwingungen zeugt noch von den Schwierigkeiten, unter denen die Annahme derselben erschien: „Was aber die theoretischen Ideen des Verfassers über die besondere Gattung von Undulationen betrifft, in welchen nach ihm das Licht bestehen soll, so konnte sie gegenwärtig kein entscheidendes Urtheil darüber fällen, sie durfte aber auch ohne Ungerechtigkeit die Bekanntmachung eines Werkes nicht länger aufschieben, dessen Schwierigkeiten schon durch die vergeblichen Versuche der geschicktesten Physiker bewiesen sind und in welchem das Talent der Beobachtung und das Genie des Erfinders in gleich hohem Grade vereinigt gefunden werden [2]."

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

Aus der Hypothese von der Transversalität der Lichtschwingungen folgten mit überraschender Leichtigkeit alle Erscheinungen der Polarisation: ihre Entstehung, die Eigenschaften derselben in Bezug auf Reflexion und Refraction und endlich selbst die Sätze über die Interferenz des reflectirten Lichtes, deren experimentelle Entdeckung erst den Anlass zu jener Hypothese gegeben hatte. Dagegen bot die Entstehung der Doppelbrechung noch Schwierigkeiten, die auch Fresnel nicht ganz überwinden konnte.

Fresnel entdeckte bei seiner Behandlung der Doppelbrechung, dass in zweiachsigen Krystallen keiner der Strahlen das Brechungsgesetz befolge. Danach konnte die Doppelbrechung nicht, wie Young annahm, durch die Bildung einer Kugelwelle und einer ellipsoidischen Welle erklärt werden. Doch gelang es auch Fresnel nicht, die Gestalt der Wellenfläche deductiv abzuleiten, vielmehr nahm er, wie aus seinen nachgelassenen Schriften hervorgeht, die Gleichung der Wellenfläche, weil sie für bestimmte Annahmen in zwei Flächen vom zweiten Grade zerfallen musste, als eine Gleichung vierten Grades a priori an und bestimmte nachträglich erst inductiv die Coefficienten derselben [3]. Als Ursache der Doppelbrechung gab Fresnel wie Young eine in den Krystallen im Allgemeinen ungleiche Elasticität des Lichtäthers nach den verschiedenen Richtungen hin an. In doppeltbrechenden Krystallen ist die Elasticität in drei auf einander senkrechten Achsen eine grösste, mittlere und kleinste. Die Elasticitätskraft, welche ein schwingendes Theilchen in seine Gleichgewichtslage zurücktreibt, ist, weil der Aether unzusammendrückbar, von der Fortpflanzungsrichtung der Wellen unabhängig und hängt nur von der Schwingungsrichtung des Theilchens selbst ab.

[1] Auch Pogg. Ann. XXIII, S. 372 bis 434, 494 bis 556, 1831.

[2] Vergl. Whewell-Littrow, Geschichte der inductiven Wissenschaften II, S. 466 bis 472.

[3] Vergl. Verdet-Exner, Wellentheorie des Lichtes I, S. 358, Braunschweig 1883.

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

In einem homogenen Mittel aber ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Quadratwurzel aus der Elasticitätskraft proportional. Aus diesen Annahmen, denen sich noch die letzte zugesellte, dass die Schwingungen des polarisirten Lichtes auf der Polarisationsebene senkrecht stehen, folgten dann rein mathematisch alle Erscheinungen der Doppelbrechung, vor Allem die Grundphänomene, dass es in jedem doppeltbrechenden Krystall zwei Richtungen, die optischen Achsen, giebt, in denen Strahlen von allen Polarisationsrichtungen mit gleicher Geschwindigkeit und somit unzerlegt fortgepflanzt werden, dass aber jeder in einer von den optischen Achsen abweichenden Richtung einfallende Strahl in zwei polarisirte Strahlen zerlegt wird, deren Polarisationsebenen senkrecht auf einander stehen. Zur Construction dieser Strahlen dient, wie schon bei Huyghens, die Wellenfläche, die aus zwei einander ganz einschliessenden und in vier Punkten, den Endpunkten der optischen Achsen, zusammenhängenden Schalen zusammengesetzt ist [1]).

Fresnel's Theorie der Polarisation und der Doppelbrechung des Lichtes erwies sich fruchtbar und erhielt bald weitere Bestätigungen. Seine Untersuchungen über die Elasticität der Körper regten zu weiteren Arbeiten nach dieser Richtung hin an und wurden zur Grundlage für alle folgenden Theorien der Elasticität überhaupt. Für den Zusammenhang der Elasticität der Körper mit den optischen Erscheinungen in denselben brachte er selbst einen sicheren Beweis, indem er nachwies [2]), dass Glas doppeltbrechend wird, wenn man es einem Druck nach einer Richtung hin aussetzt, und dass es dabei eine optische Achse erhält, deren Richtung mit der Richtung des Druckes zusammenfällt.

Bei der Beobachtung der totalen Reflexion hatte Fresnel bemerkt, dass zwei verschieden polarisirte Lichtstrahlen, wenn sie an der inneren Fläche eines Glases vollständig zurückgeworfen werden, verschiedene Verzögerungen ihrer Schwingungen erleiden und dass danach die Strahlen theilweise die Eigenschaften polarisirter Strahlen behalten, theilweise aber auch nicht. Dies veranlasste ihn, das Zusammentreffen von Strahlen genauer zu untersuchen, die nicht in derselben Ebene polarisirt und also nicht interferenzfähig sind. Zwei Schwingungen können sich in einem Punkte nur vollständig aufheben, wenn sie in derselben Richtung geschehen. Ist das nicht der Fall, so werden sie sich zu einer geradlinigen Schwingung noch zusammensetzen, wenn sie in ganz demselben Schwingungszustande in dem Punkte zusammentreffen, oder wenn ihr Phasenunter-

[1]) Vergl. Verdet-Exner, Wellentheorie I, S. 356 ff. Beer, Einleitung in die höhere Optik, 2. Aufl., S. 257 ff. Braunschweig 1882.

[2]) Ann. de chim. et de phys. XX, S. 376, 1822. Pogg. Ann. XIX, S. 539, 1830. Noch vor Fresnel hatte Brewster erkannt, dass polarisirtes Licht beim Durchgange durch comprimirtes Glas gefärbt werde.

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

schied gleich Null ist. Trifft auch das Letztere nicht zu, so werden die beiden geradlinigen Schwingungen im Allgemeinen sich in eine elliptische Schwingung umsetzen, die für die bestimmte Phasendifferenz von $^1/_4$ der Schwingungsdauer in eine kreisförmige übergeht. Durch diese elliptische oder circulare Polarisation des Lichtes vermochte Fresnel nicht bloss jene Erscheinungen bei der totalen Reflexion, sondern auch alle Eigenthümlichkeiten der sogenannten Rotationspolarisation zu erklären, die Biot am Quarz und verschiedenen Flüssigkeiten beobachtet, und die ihm so viel Schwierigkeiten gemacht hatten [1]).

Fresnel starb im Jahre 1827, ohne den vollständigen Sieg seiner Ansichten erlebt zu haben. Zuerst hatte er einen schweren Kampf mit Biot gekämpft. Der Letztere, welcher eben die verwickelten Polarisationserscheinungen unter dem Beifalle der Physiker nach der Emanationstheorie erklärt, war natürlich nicht geneigt, den Preis seiner Bemühungen ohne Weiteres aus der Hand zu geben. Es kam zu recht erregten Auseinandersetzungen, die sich vor Allem im XVII. Bande der Annales de chimie et de physique finden. Biot sagt in der dritten Auflage seines Lehrbuches der Experimentalphysik [2]) über seine Theorie der beweglichen Polarisation: „Diese Untersuchung schien mir mit der vollkommensten Evidenz zu ergeben, dass das abwechselnde Hin- und Wiedergehen der Polarisationsebene der Lichtmolecüle nicht allein die unmittelbare Folgerung aus den Erscheinungen und ihr getreuer Ausdruck ist, sondern auch, dass es die einzige Art ist, wie sich die Erscheinungen nach der Hypothese der Materialität des Lichtes, der ich bei ihrer Auseinandersetzung gefolgt bin, darstellen lassen. Wenn andere Systeme über die Grundbeschaffenheit des Lichtprincipes andere Betrachtungs- oder Deutungsarten der nämlichen Thatsachen erfordern, so werden Diejenigen, die sich an diese Systeme halten, ohne Zweifel sich bemühen müssen, die Erscheinungen mit derselben Schärfe bis in ihre innersten Eigenthümlichkeiten danach zu erklären und darzustellen; und wenn es ihnen gelingt, werden sie ein nützliches Werk vollbracht haben, dem ich meinen Beifall nicht versagen werde". Und wirklich blieb ihm bei seinem langen Leben dieser Beifall und der vollständige Uebergang ins Lager seines Gegners nicht erspart. Ganz ungeheuerlich, wie schon angedeutet, erschien den Physikern die Annahme von Transversalschwingungen des Aethers. Selbst Arago, der bis dahin Fresnel mannhaft gegen Biot vertheidigt, wagte hierin nicht direct zu folgen. Laplace vermochte bis zu seinem Tode nicht sich zu derselben zu bekehren. Poisson bewies in dem

---

[1]) Annales de chimie et de physique XXVIII, S. 147, 1825; Pogg. Ann. XXI, S. 276, 1831. Aufsätze über die circulaire Polarisation hatte Fresnel schon 1817 und 1818 der Pariser Akademie überreicht; allein dieselben wurden nicht gedruckt und auch Auszüge aus denselben nicht veröffentlicht.

[2]) Band IV, S. 166.

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

XXII. Bande der Annales de chimie et de physique, dass nach den bisherigen Vorstellungen von einer elastischen Flüssigkeit alle Schwingungen derselben normal zur Wellenfläche sein müssten und nicht in tangentialer Richtung stattfinden könnten, dass alle Transversalschwingungen vielmehr neue Kräfte in dem Aether erforderten. Fresnel aber zeigte in dem XXIII. Bande derselben Zeitschrift[1]), dass Poisson in der That seine Vorstellung vom Aether und der Elasticität desselben corrigiren könne, dass man dem Aether ebenso gut die elastischen Eigenschaften eines festen Körpers als die einer Flüssigkeit beilegen dürfe, und danach kamen auch die mathematischen Physiker zur Einsicht von der Möglichkeit der Transversalschwingungen. Trotzdem blieb die Allgemeinheit noch bis zum Jahre 1830 bei der Meinung, dass die Emissions- wie die Undulationstheorie die optischen Erscheinungen ungefähr gleich gut erklärten. Erst nach diesem Jahre wandten sich langsam die Ansichten. Fechner sagt schon in seinem Repertorium der Physik von 1832 (Bd. II, S. 345): „Die Undulationstheorie fängt seit der Entwickelung, die sie namentlich durch Fresnel erhielt, so sehr an, das Uebergewicht über die Emissionstheorie zu gewinnen; sie erklärt viele Erscheinungen, die bis jetzt noch als ungelöst, oder nur durch sehr precäre Voraussetzungen zu lösende Probleme für die letztere dastehen, auf eine so einfache und ansprechende Weise, dass eine Bekanntschaft mit derselben für Jeden, der eine gründliche Ansicht in der Lehre des Lichtes und namentlich der so interessanten und merkwürdigen Polarisationsphänomene erlangen will, immer unentbehrlicher wird". Einzelne Physiker aber hielten noch länger an der alten Theorie fest und Brewster z. B. rief noch 1833 erbittert aus[2]): „Aus diesen Gründen habe ich bis jetzt noch nicht gewagt, vor dem neuen Altar nieder zu knien und ich muss selbst bekennen, an der nationalen Schwäche zu leiden, welche mich antreibt, den fallenden Tempel, der einst Newton's Werkstätte war, zu verehren und zu stützen".

Die hier angedeuteten Gründe Brewster's gegen die Undulationstheorie ruhten auf neuen optischen Entdeckungen, auf der Beobachtung der hellen und dunklen Linien im Spectrum leuchtender Körper. Indessen musste Brewster noch erleben, dass auch diese Erscheinungen zu sicherem, unwiderleglichem Beweise für die Wellentheorie des Lichtes wurden. Wollaston hatte im Jahre 1802 in einer Abhand-

---

[1]) Auch in Poggendorff's Annalen XXIII, S. 400 bis 405, 1831. Fresnel giebt darin zu, dass nach der alten Annahme einer nach allen Richtungen gleichen Compressibilität des Aethers Transversalschwingungen unmöglich seien. Er verlangt aber von den Mathematikern, dass sie den Widerstand des Aethers gegen eine Compression (in der Richtung der Fortpflanzung der Wellen) viel grösser annehmen sollen als die Elasticität, welche durch eine blosse (transversale) Verschiebung der Theilchen in Thätigkeit gesetzt wird.

[2]) Phil. Mag. (3) II, S. 360; Poggend. Ann. XXVIII, S. 381, 1833.

lung[1]) über die Bestimmung der Brechungsverhältnisse und der zerstreuenden Kräfte der Substanzen mit Hülfe der totalen Reflexion einige merkwürdige Bemerkungen über die Beschaffenheit der Spektren angeführt. Er giebt da an, das Spectrum des Sonnenlichtes bestehe aus vier Farben, roth, gelblich-grün, blau und violett, die durch deutliche schwarze Linien begrenzt seien; nur die Grenze zwischen grün und blau sei nicht so scharf markirt, und zu beiden Seiten der Grenze fänden sich noch je eine dunkle Linie. Auch die Spectren von glühenden Körpern oder elektrischem Lichte seien nicht zusammenhängend, sondern bestünden aus mehreren, durch Zwischenräume gesonderten Farbenstreifen. Die Constanz dieser Erscheinungen erkannte Wollaston nicht und meinte vielmehr, dieselben seien je nach dem Prisma und dem Glanze des Lichtes veränderlich. Er legte deshalb der Sache keine weitere Wichtigkeit bei und die anderen Physiker folgten seinem Beispiele.

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

Anders Fraunhofer[2]), dessen erste Arbeit über 10 Jahre später im I. Bande der Denkschriften der Münchener Akademie für die Jahre 1814/1815 erschien[3]). Fraunhofer constatirte, dass die Vollkommenheit

---

[1]) William Hyde Wollaston (6. August 1766 East-Dereham — 22. December 1828 London; anfangs Arzt, dann als Privatmann lebend): A method of examining refractive and dispersive powers by prismatic reflection, Phil. Trans. 1802. Auch in Gilbert's Annalen XXXI, S. 235 bis 251, S. 398 bis 415, 1809.

[2]) Joseph Fraunhofer wurde am 6. März 1787 in Straubing in Bayern als der Sohn eines armen Glasers geboren, dem er im Geschäfte so früh und so sehr helfen musste, dass er bis zum 14. Jahre des Lesens und Schreibens unkundig blieb. 1806 kam er, nachdem er schon vorher bei einem Spiegelmacher und Glasschleifer in der Lehre gewesen, in das mechanisch-optische Institut von Utzschneider in Benediktbeuren; 1809 trat er als Theilnehmer in dasselbe ein. Nachdem 1819 die Anstalt nach München verlegt worden, wurde Fraunhofer dort Professor, Mitglied der Akademie und Conservator des physikalischen Cabinets. Am 7. Juni 1826 starb er in München. Seine optischen Instrumente, seine Fernröhre, die auf allen Sternwarten zu finden, sind die besten Denkmäler seiner Genialität. Sein Leichenstein trägt die Inschrift: „Approximavit sidera!"

[3]) Ein Auszug daraus befindet sich in Gilbert's Annalen (LVI, S. 264 bis 313, 1817) unter dem Titel: „Bestimmung des Brechungs- und Farbenzerstreuungsvermögens verschiedener Glassorten in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernröhre". Ob Fraunhofer die Abhandlung Wollaston's gekannt, bleibt mir zweifelhaft. Er selbst sagt in seiner Schrift nichts darüber und spricht vielmehr von seiner Beobachtung der dunklen Linien als von einer Entdeckung. (Gilb. Ann. LVI, S. 278.) Auf der anderen Seite erinnert die Aeusserung, dass die schwarzen Linien keineswegs die Grenzen der verschiedenen Farben seien, an die gegentheilige Behauptung Wollaston's. Endlich ist überhaupt nicht leicht anzunehmen, dass Fraunhofer die Abhandlung Wollaston's, die bereits in Gilbert's Annalen gedruckt und für ihn so wichtig war, übersehen haben sollte. Als Entdeckungen dürfte Fraunhofer seine Beobachtungen, bei der Unentwickeltheit der Wollaston'schen, immer noch bezeichnen.

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

achromatischer Objective stark unter der Unsicherheit über die dispersive Kraft der Glassorten leidet. Er versuchte zuerst die farbenzerstreuende Kraft verschiedener Glassorten aus den Längen der Spectren zu bestimmen, welche Prismen erzeugten, fand aber dies unthunlich, weil die Spectren keine scharfen Grenzen hatten. Das Zerstreuungsvermögen für jede einzelne Farbe liess sich nicht finden, weil deren Stelle im Spectrum nicht fest anzugeben war. Flammen, die nur einzelne Farbentöne oder homogenes Licht aussenden, wären zu diesem Zwecke brauchbar gewesen; aber Fraunhofer konnte keine solche Flammen entdecken. Glücklicherweise bemerkte er bei diesen Versuchen, dass in den Spectren aller Flammen von Alkohol, Oel, Salz, überhaupt alles Feuers, zwischen dem Roth und Gelb ein heller scharf begrenzter Streifen sich zeigte, der bei allen Spectren genau an demselben Orte sich befand. Diesen Farbenstreifen benutzte er, um durch ziemlich complicirte Methoden bestimmte Stellen der Spectren zu fixiren. Als er dieselbe Methode auf das Spectrum der Sonne anwenden wollte, bemerkte er im Sonnenspectrum alle möglichen Stellen direct fixirt, durch starke und schwache verticale Linien, die aber nicht heller, sondern dunkler waren, als die übrigen Theile des Farbenbildes, und von denen einige ganz schwarz zu sein schienen. Fraunhofer beobachtete diese dunklen Linien, welche nach ihm benannt worden sind, indem er vor dem Fernrohre eines Theodoliten ein Prisma von Flintglas aufstellte, auf welches durch einen schmalen Spalt in dem 24 Fuss vom Prisma entfernten Fensterladen das Sonnenlicht fiel. Er beobachtete also noch vor Fresnel die Farbenbilder ohne vorherige objective Darstellung subjectiv und war jedenfalls der Erste, welcher dabei ein vergrösserndes Instrument benutzte. So konnte er solcher Linien, deren hauptsächlichste er, wie bekannt, mit Buchstaben bezeichnete, allein zwischen $B$ und $H$ ungefähr 574 zählen. Die Entfernungen der stärksten maass er mit dem Theodoliten und trug dieselben in richtigem Verhältniss auf einer Zeichnung auf; die schwachen zeichnete er nur nach Augenmaass ein[1]). Die Linien waren im Sonnenspectrum immer unter denselben Verhältnissen vorhanden und blieben unter allen Umständen in denselben Farbentönen liegen; auch überzeugte sich Fraunhofer, dass sie in der Natur des Sonnenlichtes begründet und nicht durch Beugung des Lichtes, oder gar durch Täuschung hervorgerufen waren. Durch die merkwürdige Natur der Linien zu weiteren Betrachtungen angeregt, fand Fraunhofer dieselben Linien auch im Spectrum der Venus und zwar in ganz denselben Verhältnissen. Im Lichte des Sirius bemerkte er einen Streifen im Grünen und zwei im

---

[1]) Die Zeichnung ist reproducirt in den Münchener Denkschriften für 1814 und 1815; zur Hälfte verkleinert in Gilbert's Annalen LVI, Tafel IV; ebenso in Gehler's physikalischem Wörterbuch IV, Tafel II, Fig. 19.

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

Blauen, die aber mit denen des Sonnenlichtes keine Aehnlichkeit hatten; auch andere Fixsterne zeigten Streifen, aber wieder von den vorigen verschiedene. Im Spectrum des elektrischen Lichtes fanden sich ebenfalls helle Linien, vor Allem eine glänzende im Grünen. Das Spectrum von Lampenlicht, wie das von Wasserstoff oder Alkohol, zeigte zwei nahe, röthlich-gelbe, helle Linien, die den beiden dunklen $D$-Linien im Sonnenspectrum ganz ähnlich waren.

Selbst nach dieser Arbeit Fraunhofer's scheint man von Seiten der Physiker den Linien wenig theoretische Wichtigkeit beigelegt zu haben. Biot erwähnt sie selbst in der dritten Auflage seines Lehrbuches noch nicht, und die ersten Bände von Gehler's physikalischem Lexikon machen auch nur wenig Aufhebens von ihnen. Erst nach einer zweiten grösseren, in der Hauptsache ein ganz anderes Ziel verfolgenden Abhandlung Fraunhofer's begannen auch andere Physiker mit der Beobachtung der Erscheinungen. Diese Abhandlung erschien im achten Bande der Münchener Denkschriften von 1821 und 1822[1]), sie beschäftigt sich fast ausschliesslich mit Beugungserscheinungen. Wenn man Licht durch eine schmale Oeffnung auf einen Schirm fallen lässt, so erhält man bekanntlich (wie bei Fresnel etc.) neben einem hellen Centralstreifen zu beiden Seiten Farbenstreifen oder vielmehr ganze Spectren, deren einzelne Lichter aber nicht homogen sind, diese bezeichnet Fraunhofer als Spectren erster Classe. Setzt man an die Stelle der einen Lichtöffnung eine grosse Anzahl von gleichen Oeffnungen, deren Entfernungen einander genau gleich sind, so entstehen in den Räumen der ersten neue Spectren aus vollkommen homogenem Lichte, diese bezeichnet Fraunhofer als Spectren zweiter Classe. Um solche gleiche Oeffnungen herzustellen, benutzte Fraunhofer dünnen Draht, den er in die Gänge einer sehr feinen Schraube spannte, oder er radirte in ein mit Goldblättchen belegtes Planglas feine Parallellinien (die feinsten hatten eine Entfernung von 0,00114 Zoll), oder er ritzte mit einer ausgesucht feinen Diamantspitze Parallellinien unmittelbar in die Oberfläche eines Planglases. Diese Linien wurden so fein, dass sie selbst mit dem Mikroskope nicht mehr zu unterscheiden waren; Fraunhofer berechnete die Entfernung der einzelnen zu 0,0001223 Zoll. Durch die feinen Gitter erhält man sehr ausgedehnte Spectren zweiter Classe, so gross, dass man dieselben eben so gut wie die von grossen Prismen hervorgebrachten beobachten kann[2]). In diesen Beugungsspectren findet man auch dieselben Linien, wie in prismatischen Spectren und ganz in denselben

---

[1]) Weitere Beobachtungen enthalten Gilbert's Annalen (Bd. LXXIV, S. 337 bis 378, 1823) unter dem Titel: „Neue Modificationen des Lichtes durch gegenseitige Einwirkung und Beugung der Strahlen und Gesetze derselben".

[2]) Gilbert's Annalen LXXIV, S. 348, 1823.

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

Verhältnissen. Fraunhofer schliesst daraus, dass dieselben sicher in der Natur des Lichtes begründet, nicht durch Nebenumstände, sondern in Wirklichkeit durch das Fehlen bestimmter Wellenlängen in den Schwingungen des Lichtäthers hervorgerufen werden. Wodurch aber dieses Fehlen verursacht wird, darauf geht er nicht ein. Die Linien zeigten sich so deutlich, dass noch im zweiten Spectrum (von der hellen Mitte aus) die $D$-Linien doppelt gesehen wurden und ihre Zwischenräume gemessen werden konnten; verfolgbar waren dieselben überhaupt noch bis ins 13. Spectrum. Young wie Fresnel waren sich darüber klar, dass man aus den Dimensionen der Beugungsspectren die Wellenlängen der einzelnen Farbentöne berechnen könne. Wenn sie trotzdem diese Bestimmung nicht direct ausführten, so lag das wohl daran, dass ihnen die Bestimmung fixer Stellen in den Spectren nicht ausführbar erschien. Für Fraunhofer war das letztere mit Hülfe der in den Spectren zweiter Classe hervortretenden dunklen Linien ein Leichtes. Aus den Entfernungen entsprechender Linien in den benachbarten Spectren und den Abständen der leuchtenden Oeffnungen bestimmte er bequem die Wegdifferenzen der Lichtstrahlen und damit die Wellenlängen der den dunklen Linien zugehörigen Farben. Seine letzten Bestimmungen ergaben für die Wellenlängen der betreffenden Linien:

$$C\omega = 0{,}00002422$$
$$D\omega = 0{,}00002175$$
$$E\omega = 0{,}00001945$$
$$F\omega = 0{,}00001794$$
$$G\omega = 0{,}00001517$$
$$H\omega = 0{,}00001464$$

Der Ort der Linie $B$ war bei diesen Messungen nicht genau zu bestimmen; die Linie $A$ hat Fraunhofer überhaupt in den Gitterspectren nicht wahrnehmen können. Ueber die prismatischen Spectren und ihre Linien giebt Fraunhofer in dieser Abhandlung wenig Neues. Doch berichtet er von der Construction eines grossen Apparates, der nur zur Beobachtung der Planeten- und Fixsternspectren dienen soll, und mit dem er dann auch noch mehrere dahin gehörige Beobachtungen angestellt hat.

Fraunhofer ist ein entschiedener Anhänger der Undulationstheorie. Das geht aus seinen Worten hervor: „Selbst Diejenigen, welche sich nicht zum Undulationssysteme bekennen, werden, wenn sie die Resultate der Versuche für sich betrachten, zugestehen, dass $\omega$ eine reale Grösse ist. Was man übrigens auch unter dieser Grösse sich denke, so muss sie in jedem Falle von der Natur sein, dass die eine Hälfte derselben in Hinsicht der Wirkung der anderen Hälfte entgegengesetzt ist, so dass, wenn eine vordere Hälfte mit einer hinteren Hälfte genau zusammentrifft, oder sie auf diese Weise unter einem kleinen Winkel schneidet, die Wirkung sich aufhebt, indessen sie sich verdoppelt,

wenn z. B. zwei vordere oder auch zwei hintere Hälften in einem Sinne zusammentreffen. Dieses ist bei der Interferenz zu Grunde gelegt. Wer etwas anderes als eine Welle mit dieser Eigenschaft sich denken kann, mag es seiner Ansicht anpassen"[1]).

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

Doch hat Fraunhofer bei seinen Versuchen keineswegs die Ausbildung der Theorie besonders vor Augen. Er behandelt auch die Erscheinungen eher noch nach Young als nach Fresnel und denkt sich die Interferenz, so scheint es wenigstens, durch zwei Strahlen, statt durch das Zusammenwirken aller auffallenden, hervorgerufen. Er versuchte auch nicht, die so auffallenden Erscheinungen seiner Gitter aus der Undulationstheorie mathematisch deductiv abzuleiten und aus der Uebereinstimmung dieser Resultate mit den Ergebnissen der Beobachtung auf die Sicherheit der Undulationstheorie zu schliessen. Sein Ziel war nur das nächstliegende, die thatsächliche Feststellung der Erscheinungen und Benutzung derselben für seine technisch-wissenschaftlichen Ziele, die Herstellung guter achromatischer Refractoren.

Eine Deduction der Gittererscheinungen aus der Hypothese der Undulationstheorie und damit eine experimentelle Bestätigung dieser Theorie gelang zuerst Schwerd[2]) in seinem berühmten Werke: „Die Beugungserscheinungen aus den Fundamentalgesetzen der Undulationstheorie analytisch entwickelt" (Mannheim 1835). Fraunhofer hatte einfache Gitter, gekreuzte Gitter, Partiegitter (Partien von Gittern, die sich regelmässig wiederholen), sowie runde Oeffnungen bei seinen Beugungserscheinungen verwandt; John Herschel hatte 1828 auch Dreiecke und Partien von Dreiecken zugefügt. Schwerd zeigte, dass alle diese mannigfaltigen Erscheinungen rein deductiv abzuleiten seien und dass dadurch die Undulationstheorie so vielfach als nur denkbar bestätigt werde. Danach verstummten auch die letzten Einwendungen gegen diese Theorie. J. Babinet aber war schon 1829 durch Betrachtung der Gittererscheinungen so sehr von der Wahrheit der Undulationshypothese überzeugt worden, dass er vorschlug, die Länge einer bestimmten Lichtwelle als Einheit des Längenmaasses anzunehmen, weil diese Grösse absolut unveränderlich und selbst von kosmischen Revolutionen unabhängig sei[3]).

---

[1]) Gilbert's Annalen LXXIV, S. 369, 1823. $\omega$ bedeutet hier natürlich die Wellenlänge.

[2]) Friedrich Magnus Schwerd (8. März 1792 Otthofen bei Worms — 22. April 1871 Speyer) studirte 1809 bis 1813 in Mannheim und Mainz, wurde 1814 Lehrer am Progymnasium und 1816 Professor am Lyceum in Speyer, welche Stelle er 55 Jahre lang bis zu seinem Tode bekleidete. Mitglied der Akademie in München, wie der Royal Society.

[3]) Jacques Babinet (1794 Lusignan — 1872 Paris, Professor der Physik in Poitiers, dann in Paris): Sur les couleurs des réseaux, Ann. de chim. et de phys. (2) XL, p. 166, 1829; Poggendorff's Annalen XV, S. 505.

Undulationstheorie des Lichtes, c. 1815 bis c. 1830.

Eine eigenthümliche, wunderbare Bestätigung erfuhr noch die Undulationstheorie um das Jahr 1832, eine Bestätigung, die man wohl mit der Verificirung der Newton'schen Gravitationsidee durch Leverrier's rechnende Entdeckung des Neptun verglichen hat[1]). W. R. Hamilton fand durch Rechnung, dass unter gewissen Umständen ein Lichtstrahl beim Austreten aus einem doppeltbrechenden Krystall weder einfach bleiben, noch sich in zwei Strahlen spalten kann, sondern sich in einen hohlen Lichtkegel verwandeln muss. Lloyd[2]) bestätigte auf Ansuchen Hamilton's durch Versuche dieses Resultat; der Lichtkegel bildete sich, auf Papier aufgefangen, in einem lichten Ringe ab. Die Erscheinungen sind unter dem Namen der conischen Refraction bekannt.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

Mehrfach hatte schon der **Galvanismus** in andere physikalische Gebiete übergegriffen, ohne dass man diesen Erscheinungen die rechte Beachtung geschenkt oder dieselben in ihrer Bedeutung richtig erfasst hätte. Man hielt solche Wirkungen des galvanischen Stromes entweder wie die chemischen Zersetzungen für selbstverständlich, oder man wusste gar nichts mit ihnen anzufangen und erwähnte sie nicht weiter. Um so mehr Aufsehen erregte es, als nun der Strom auch magnetische Wirkungen zeigte und selbst die Compassnadel nicht mehr in Ruhe liess. Die abgeschlossenste und engste physikalische Disciplin, der Magnetismus, die nur in Eisen und nur durch dieses wirksamen magnetischen Flüssigkeiten, sie wurden jetzt durch den Galvanismus erobert und ersetzt; das war selbst für viele conservative Physiker ein Weckruf, ihre Vorstellung von der Wirksamkeit der Elektricität und damit von der Natur der Kräfte überhaupt beträchtlich zu verallgemeinern. Wenn der elektrische Strom magnetische Wirkungen ausüben konnte, dann war die Vorstellung zweier verschiedenartigen elementaren, imponderablen Flüssigkeiten, der elektrischen und der magnetischen, nicht mehr zu halten, und zum ersten Male musste eine der bis dahin in der Physik so feststehenden imponderablen Materien wieder aufgegeben werden. Damit war überhaupt der erste Streich zur Fällung eines ganzen physikalischen Systemes gethan. Wenn die magnetischen Erscheinungen und die magnetischen Kräfte nicht mehr von besonderen Materien verursacht, sondern vielen Materien durch strömende Elektricitäten eigen werden sollten, so war die Kraftwirkung von der elementaren Qualität der Materie entbunden und auf Bewegungserscheinungen wenigstens theilweise zurückgeführt. Das aber war der erste Schritt von der Newton'schen Physik wieder rückwärts zu Descartes, und daher das allerdings mehr instinctive als be-

---

[1]) Fechner, Atomenlehre, 2. Aufl., S. 30.

[2]) Philosophical Magazine (3) II, p. 112 und 207, 1832; Poggendorff's Annalen XXVIII, S. 91 und 104, 1833.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

wusste Gefühl von der grossen Bedeutung der neuen galvanischen Wirkungen.

Und doch, trotz der grossen Ueberraschung, welche die Beobachtung magnetischer Wirkungen der Elektricität hervorrief, waren diese Beobachtungen durchaus nicht unvorbereitet. Seit langer Zeit wusste man, dass durch starke elektrische Funken, durch den Blitz Stahlnadeln magnetisch, oder Magnetnadeln unmagnetisch, oder die letzteren gar in ihrer Polarität umgekehrt werden konnten [1]). Van Marum [2]) hatte zwar diese Magnetisirungen aus dem Erdmagnetismus abgeleitet, dessen Wirkung nur durch die elektrischen Erschütterungen beschleunigt würde, und so das Wunderbare beseitigt. Kühnere Physiker aber, die gern speculirten, versuchten trotzdem immer wieder aus der Aehnlichkeit der elektrischen und magnetischen Anziehungen und Abstossungen einen Schluss auf die Identität von Elektricität und Magnetismus zu machen. Ritter z. B. hatte kurzweg behauptet, dass jede Volta'sche Säule ein Magnet, ja jede nur aus Zink und Silber zusammengelöthete Nadel eine Magnetnadel sei. Prechtl hing im Jahre 1808 zur Beobachtung einer etwaigen magnetischen Wirkung eine Volta'sche Säule in Seidenschnüren wirklich auf [3]) und behauptete im Jahre 1810 ganz allgemein: „Solchergestalt treten in der Natur alle Erscheinungen entweder als attractiver Effect oder als chemischer Effect der Elektricität auf. Unter die Kategorie des ersteren gehören alle Phänomene der Cohäsion, der Krystallisation überhaupt, die gewöhnlichen elektrischen Phänomene, die Phänomene der allgemeinen Anziehung der Schwere, der Magnetismus; unter die Kategorie des zweiten gehören alle Erscheinungen, welche die Chemie umfasst, so dass eigentlich Magnetismus und Chemismus, die beiden Hauptzweige der allgemeinen Wissenschaft, Elektricismus sind [4])".

---

[1]) G. Wiedemann, die Lehre von der Elektricität, Braunschweig 1883, III, S. 92: „Die Magnetisirung resp. Aenderung derselben durch den elektrischen Strom ist zuerst bei Blitzschlägen an den Compassen von Schiffen (Phil. Trans. abridged II, p. 309, 1676) und stählernen Werkzeugen (ibid. 1732, abr. VIII, p. 25) wahrgenommen worden".

[2]) Beschreibung einer vorzüglich grossen Elektrisirmaschine, Leipzig 1786.

[3]) Gilbert's Ann. LXVII, S. 81. Johann Joseph Prechtl, 1778—1854, Director des polytechnischen Instituts in Wien.

[4]) Gilbert's Annalen XXXV, S. 43, 1810. Der ganze Schelling'sche Kreis in München sprach damals gern, wie vom thierischen Magnetismus, so auch von der Identität des Magnetismus und der Elektricität; in dem Journal von Gehlen (der Mitglied der Münchener Akademie war) finden sich mehrere solcher Artikel. Dort behauptet z. B. Schweigger (Bd. VII, 1808): „Magnetismus und Elektricität sind nur Modificationen ein und derselben Kraft". Trotzdem sprach 1820 gerade Schweigger sich mit grösstem Enthusiasmus über Oersted's Entdeckung aus. Das hat freilich nicht gehindert, dass ein Ungenannter noch im Jahre 1873 (Zeitschr. f. Math. und Physik XVIII, S. 609) auch Schweigger zu dem eigentlichen Entdecker des Elektromagnetismus gemacht hat, nur weil er a. a. O. für die Coulomb'sche Drehwage zur Messung von Elektricität statt der Torsion des Fadens die Benutzung der richtenden

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

Indessen trieben solche Vornahmen, denen keine oder ganz ungenügende Thatsachen zu Grunde lagen, die Physiker eher zur gegentheiligen Meinung, als dass sie dieselben für sich gewannen. Ein anderes Aussehen erhielten diese Sachen in den Augen der Allgemeinheit erst nach der Entdeckung des Elektromagnetismus durch Oersted. Gleich im Jahre 1820 wies man auf zwei Werke aus dem Jahre 1804 hin, in denen sich schon die Beobachtungen elektromagnetischer Erscheinungen finden sollten [1]. Aldini sagt in seinem Traité sur le Galvanisme (Paris 1804) von G. Mojon [2]: „Ayant placé horizontalement des aiguilles à coudre, très-fines, et de la langueur de deux pouces, il en a mis les deux extrémités en communication avec un appareil à tasses de 100 verres. Au bout de 20 jours il a retiré les aiguilles un peu oxydées, mais en même temps magnétiques avec une polarité très-sensible“. Ueber Romagnosi [3] fährt er dann fort: „Cette nouvelle proprieté du Galvanisme a été constatée par M. Romanesi, physicien de Trente, qui a reconnu que le Galvanisme faisoit décliner l'aiguille aimantée“. Aehnlich sprach sich J. Izarn in seinem Manuel du Galvanisme (Paris 1804) aus: „D'après les observations de Romagnosi, physicien de Trente, l'aiguille déja aimantée et que l'on soumet ainsi au courant galvanique éprouve une déclinaison, et d'après celles de G. Mojon, savant chimiste de Gènes, les aiguilles non aimantées acquirent par ce moyen une sorte de polarité magnétique“. Indessen kam man damals noch ziemlich allgemein zu einer Ansicht, wie Muncke sie in Gehler's physikalischem Wörterbuche (III, S. 475, 1827) aussprach, dass nämlich die oben Genannten keineswegs als Entdecker des Elektromagnetismus statt Oersted anzunehmen seien, „weil sie (jedenfalls) die Wichtigkeit des Fundes übersahen und diesen also nicht kannten und gehörig würdigten“. Erst als man sich ganz an die elektrischen Erscheinungen gewöhnt, sah man mit jenen Ahnungen eines Einflusses der Elektricität auf die Magnetnadel den Elektromagnetismus selbst als gegeben an. Zantedeschi [4] nahm nun im Jahre 1859 die Ehre der Entdeckung ganz für Romagnosi und die Italiener in Anspruch, und J. Hamel [5] hielt für wahrscheinlich, dass Oersted bei seinem Aufenthalte in Paris die betreffenden Versuche kennen gelernt und tadelte denselben wegen seines Schweigens. Doch zeigt gerade

---

Kraft des Erdmagnetismus, statt des am Faden hängenden Stäbchens eine mit einem Messingknöpfchen versehene isolirte Compassnadel empfahl.

[1] Configliacchi, Giornale di Fisica 1820. Gilbert's Annalen LXVIII, S. 208, 1821.

[2] Giuseppe Mojon (1772—1837), Professor der Chemie in Genua.

[3] Gian Domenico Romagnosi (1761 — 1835), bis 1802 Advocat in Trient, dann Professor in Parma, Pisa, seit 1817 als Privatmann in Mailand.

[4] L'elettro-magnetismo rivendicato a G. D. Romagnosi ed all' Italia, Trento 1859.

[5] Bulletin de l'Acad. Imp. de St. Pétersbourg II, p. 116 u. f., 1860.

die Wiedergabe von Romagnosi's Abhandlung durch Zantedeschi, dass die Beobachtungen des Ersteren mit den damals schon bekannten Einwirkungen der Elektricität auf die Magnete auf gleiche Stufe zu stellen sind. In dieser vom 3. August 1802 datirten Abhandlung, in welcher die Beobachtungen Romagnosi's beschrieben werden, heisst es [1]: „Nachdem er die Säule des Herrn Volta . . . aufgebaut hatte, befestigte er an diese Säule einen Silberdraht, der an mehreren Stellen in Form einer Kette geknüpft war. Das letzte Gelenk dieser Kette ging durch eine Glasröhre, an deren äusserem Ende sich ein ebenfalls silberner Knopf befand. Hierauf nahm er eine gewöhnliche Magnetnadel in der Art einer Schiffsboussole, die in eine hölzerne quadratische Schachtel gefasst war, hob das Glas ab, mit dem sie bedeckt war, und stellte sie auf einen gläsernen Isolator. . . . Er erfasste darauf schnell die silberne Kette an der genannten Glasröhre und berührte mit dem Ende oder dem Knopfe die Magnetnadel, welche durch die Berührung während der Zeit von mehreren Secunden um einige Grade von der magnetischen Richtung abwich. Er hob die Silberkette weg, und die Nadel blieb fest in der abweichenden Richtung . . . Er berührte von Neuem mit derselben Kette und machte so die Nadel immer mehr von der erdmagnetischen Richtung abweichen; auf diese Weise bewirkte er, dass die Nadel immer in derselben Lage verharrte . . . so dass die Polarität vollständig kraftlos blieb. Um die Polarität wieder herzustellen . . . klemmte (er) mit beiden Händen das Ende der isolirten hölzernen Büchse zwischen Daumen und Zeigefinger, ohne sie zu schütteln, und behielt sie mehrere Secunden in dieser Lage, dann sah man die Magnetnadel langsam sich zurückbewegen und ihre Polarität wiedererlangen, nicht auf einmal, sondern in mehreren auf einander folgenden Stössen [2]“.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

Wenn diese Beobachtung einer dauernden Ablenkung der Nadel wirklich, wie Hamel sagt, gerade Dasjenige wäre, „was seit 1820 als Oersted's Erfindung gilt“, und wenn Oersted wirklich dieselbe gekannt, so wäre der Letztere nicht bloss ein betrügerischer, sondern auch ein langweiliger, ungeschickter Plagiator [3]. Mindestens

[1] Erlenmeyer u. Lewinstein, Krit. Zeitschr. f. Chemie II, S. 242 ff., 1859.

[2] Romagnosi behielt sich vor, seine Entdeckungen in einer Denkschrift näher zu erläutern, doch ist diese Denkschrift nie erschienen. Vielleicht war daran die Erhebung Romagnosi's zum Professor des öffentlichen Rechts in Padua im Jahre 1802 Schuld, vielleicht aber auch konnte er in jener Sache keine weiteren Fortschritte machen und gab darum den ursprünglichen Plan auf; Zeit und Musse zu weiteren Arbeiten muss er später doch gehabt haben.

[3] Aeusserungen Hamel's lassen vermuthen, dass er Romagnosi's Entdeckungen nur nach den kurzen Andeutungen von Aldini und Izarn kennt und darum falsch beurtheilt. Er könnte sonst nicht sagen „Romagnosi's, von Oersted, so zu sagen, wiederholte Entdeckung“ und könnte noch weniger den Nadeltelegraphen „auf Romagnosi's und Schweigger's Entdeckungen begründet“ nennen.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

1804 müsste dann Oersted schon mit dem Elektromagnetismus bekannt gewesen sein. 1812 aber vertheidigt er noch in seiner „Ansicht der chemischen Naturgesetze" (Berlin 1812) die wesentliche Identität von Elektricität und Magnetismus ohne jeden Versuch eines experimentellen Beweises. 1820 kommt er dann endlich mit der nun schon alten Geschichte zum Vorschein, giebt aber die Entdeckung nicht bloss zuerst in einer ungeschickten und unzweckmässigen Form, sondern bemüht sich nachträglich auch noch, als alle Welt die Entdeckung dem Zufall zuschreiben will, zu beweisen, dass er schon länger seiner Entdeckung ohne äusseren Erfolg nachgegangen sei. Ich kann, auch wenn ich mich bemühe, dem Verdienste Romagnosi's alle Gerechtigkeit wiederfahren zu lassen, doch in dem Angeführten keine Gründe finden, die mich zwingen könnten, Oersted eine solche verächtliche Rolle zuzutrauen [1]).

Zu erfolgreichen Versuchen gelangte Oersted also, seiner eigenen Angabe gemäss, erst im Frühling 1820, bei Gelegenheit von Vorlesungen über Elektricität, Galvanismus und Magnetismus. Die Resultate derselben veröffentlichte er in einer kleinen Abhandlung Experimenta circa efficaciam conflictus electrici in Acum magneticam (Hafniae, 21. Juli 1820) [2]), die er direct an die bekannten gelehrten Gesellschaften, Physiker und Redactionen physikalischer Zeitschriften schickte. Danach wurde eine frei aufgehängte Magnetnadel, unter der ein galvanischer Strom in der Richtung vom Nordpol nach dem Südpol floss, nach Osten, wenn der Strom aber über der Nadel hinweg ging, nach Westen abgelenkt. Lag der Strom bei gleich bleibender Richtung in der Schwingungsebene der Nadel, so erfolgten nur kleine Hebungen und Senkungen des einen und des anderen Poles, und stand die Richtung des Stromes senkrecht auf der Schwin-

---

[1]) Hans Christian Oersted (14. August 1777 Rudkjöbing, Langeland — 9. März 1851 Kopenhagen) besuchte von 1794 an die Universität Kopenhagen und wurde 1799 pharmaceutischer Adjunct der medicinischen Facultät. Von 1801 bis 1803 bereiste er Deutschland, Holland und Frankreich, nach seiner Rückkehr hielt er in Kopenhagen Vorlesungen über Chemie und Physik und wurde 1806 Professor der Physik. 1812 bis 1813 unternahm er zum zweiten Male wissenschaftliche Reisen, während deren er in Berlin seine „Ansicht über die chemischen Naturgesetze, durch die neueren Entdeckungen gewonnen" und in Paris mit Marcel de Serres „Recherches sur l'identité des forces électriques et chimiques" (eine Uebersetzung des vorigen) herausgab. Nach einer Reise durch England während der Jahre 1822 und 1823 stiftete er in Dänemark eine Gesellschaft zur Verbreitung der Naturlehre, die in den verschiedensten Städten des Landes Vorlesungen halten liess. 1829 wurde er Director der polytechnischen Schule in Kopenhagen. Kurz vor seinem Tode erschien sein vielgelesenes Werk „Der Geist in der Natur" (München 1850).

[2]) Wörtlich abgedruckt in Schweigger's Journ. d. Chemie u. Physik XXIX, 275 bis 281, 1820; ins Deutsche übersetzt in Gilbert's Ann. LXVI, S. 295, 1820.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

gungsebene, so fand überhaupt keine Einwirkung statt. Merkwürdiger Weise meinte Oersted, die magnetisirenden Wirkungen des Stromes zeigten sich nur beim Glühen der Leitungsdrähte, und hielt deswegen eine grössere Säule oder eine grössere Anzahl von Becherapparaten zur Hervorbringung der Wirkungen für nöthig.

Dies war wohl die Ursache, dass zuerst noch eine kleine Pause vor der Fluth der Arbeiten eintrat. Muncke glaubte nicht eher experimentiren zu dürfen, bis er eine Säule von 106 Doppelplatten von circa 6 Zoll Seiten zusammengebracht, fand aber beim Auseinandernehmen der Säule, dass schon fünf Plattenpaare, ja endlich, dass ein Plattenpaar genügte, um die Nadel zu beeinflussen. Der erste Physiker, welcher Oersted's Entdeckung bestätigte, war J. T. Mayer[1]; ihm folgte de la Rive, der bei Gelegenheit der schweizerischen Naturforscherversammlung in Genf die Versuche Oersted's wiederholte. Danach kam die Sintfluth. Wie bei allen neu auftretenden Naturerscheinungen, die nicht zu schwierig hervorzurufen und zu beobachten sind, zeigte sich auch hier der Enthusiasmus des sonst unbetheiligten Publikums aufs Leidenschaftlichste. Wer nur ein Element und eine Magnetnadel auftreiben und nothdürftig zu behandeln vermochte, dem musste der elektrische Strom auch seine magnetischen Kunststücke zeigen. Zum Theil durch diese allgemeine Erregung, zum Theil aber auch durch die Erkenntniss von der umwälzenden Kraft der neuen Beobachtungen getrieben, folgten auch die Arbeiten der Gelehrten nun mit ungemeiner, kaum jemals erreichter Schnelligkeit auf einander.

Oersted selbst constatirte noch in demselben Jahre[2], dass eine Vermehrung der Plattenpaare in der Säule wenig zur Vergrösserung der Wirkungen beitrage, dass die letzteren vielmehr hauptsächlich durch die Grösse der Platten bestimmt würden und dass ein Glühen der Leitungsdrähte keineswegs nöthig sei. Ebenso bewies er, indem er ein Kastenelement leicht beweglich an einem Faden aufhing, dass auch umgekehrt der Magnet den Strom abzulenken vermöge. Arago, der die Experimente von de la Rive in Genf mit angesehen, zeigte noch im September 1820[3], dass Eisenfeilspähne vom Leitungsdraht, wie von einem Magneten angezogen werden, und Boisgiraud beobachtete im November 1820 directe Anziehungen des Drahtes auf eine auf Wasser schwimmende Magnetnadel. Zum Verstärken der Wirkung schwacher Ströme auf die Magnetnadel erfand Schweigger[4] im September 1820 den Multi-

---

[1]) Göttinger gelehrte Anzeigen Nr. 171, 1820.

[2]) Schweigger's Journ. XXIX, S. 364. Vergl. Hoppe, Geschichte der Elektricität, S. 197 bis 199, 1884.

[3]) Annales de chimie et de physique XV, 1820.

[4]) Johann Salomo Christoph Schweigger (8. April 1779 Erlangen — 6. September 1857 Halle), folgeweise Privatdocent in Erlangen, Prof. d. Mathem. u. Phys. am Gymn. in Bayreuth, an der höheren Realschule zu Nürnberg, Prof. d. Phys. u. Chem. in Erlangen und seit 1819 in Halle. Gab

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

plicator[1]), Poggendorff[2]) gab demselben direct die noch heute gebräuchliche Gestalt[3]). Zur Isolirung der einzelnen Windungen hatte Schweigger zuerst Siegellack oder Wachs gebraucht, gleich darauf aber wurden die Drähte, weil jene Ueberzüge zu brüchig waren, mit Seide übersponnen. Nach J. Hamel (Bull. de St. Pétersbourg II, S. 103 bis 105, 1860) rührt diese Art die Drähte zu isoliren von S. Th. v. Sömmering her, der dieselbe noch vor 1810 bei seinen Telegraphendrähten anwandte.

Das mathematische Gesetz der Wirkungen des galvanischen Stromes auf die Magnetnadel bestimmten zuerst Biot und Savart auf experimentellem Wege[4]). Sie fanden: Wenn ein, vom Volta'schen Strom durchlaufener, unbegrenzter (indéfini) Schliessungsdraht auf ein Molecül von südlichem oder nördlichem Magnetismus wirkt, welches in einem gewissen Abstande von seiner Mitte liegt, so ist die Mittelkraft der von ihm darauf ausgeübten Kräfte senkrecht auf den kürzesten Abstand des Molecüls vom Drahte, und die Gesammtwirkung des Verbindungsdrahtes auf irgend ein magnetisches, südliches oder nördliches Element verhält sich umgekehrt wie der geradlinige Abstand dieses Elementes vom Drahte. Laplace leitete daraus ab, dass auch diese Wirkungen, wie die der Gravitation, im umgekehrt quadratischen Verhältniss mit der Entfernung abnehmen.

Am originellsten, am genialsten, am erfolgreichsten von allen Physikern, Oersted selbst nicht ausgenommen, aber bearbeitete das neue mehr angedeutete als schon erforschte Gebiet Ampère, der vom 18. September 1820 ab seine Arbeiten in den Sitzungen der Akademie vorlas[5]). Die Wirkung des galvanischen Stromes auf die Magnetnadel hängt von der Richtung desselben ab; zur Bestimmung dieser Abhängigkeit gab

---

das „Journal für Chemie und Physik", Bd. I bis LIV, 1811 bis 1828, theils allein, theils mit L. G. Meincke, theils mit seinem Adoptivsohne Franz Wilh. Schweigger-Seidel heraus, der Letztere setzte dasselbe noch bis Bd. LXIX, 1833 fort.

[1]) Schweigger's Journ. XXXI, S. 12 ff., 1821.

[2]) Johann Christian Poggendorff (29. December 1796 Hamburg — 24. Januar 1877 Berlin), war 1812 Apothekerlehrling in Hamburg, studirte 1820 in Berlin, wurde 1823 mit der meteorologischen Arbeit für die Akademie betraut. Nach Gilbert's Tode übernahm er 1824 dessen Annalen der Physik und Chemie, von denen er unter seinem Namen 160 Bände herausgab. 1834 wurde er Professor an der Universität, 1839 Mitglied der Akademie.

[3]) Gilbert's Ann. LXVII, S. 422, 1821.

[4]) Ann. de chim. et de phys. XV, 1820. Biot, Lehrbuch der Experimentalphysik III, S. 136. Vor der Pariser Akademie gelesen am 30. October 1820.

[5]) Dieselben erschienen in den Mém. de l'acad. Par. VI, 1823; vorher schon in den Ann. de chim. et de phys. XV, XVI, XX, XXII, und weiter XXVI, XXVII, XXIX, XXX, auch in Gilbert's Ann. LXVII ff.; endlich in besonderen kleinen Schriften „Darstellung der neuesten Entdeckungen über die Elektricität und den Magnetismus durch Ampère und Babinet", ins Deutsche übersetzt Leipzig 1822 u. s. w. Ein ausführlicher Bericht auch in Biot's Lehrbuch der Experimentalphysik III, S. 197 bis 218.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

Ampère[1]) seine bekannte Schwimmregel, die direct statt der unbequemen Oersted'schen Regel von den Physikern angenommen wurde. Indessen begnügte Ampère sich nicht mit der Feststellung des Thatsächlichen, sein Streben ging auf die innere Verbindung der neuen Erscheinungen mit den bekannten. Die Reibungselektricität wirkt anziehend und abstossend auf alle Materie, weil sie in aller Materie Elektricität hervorruft; sollten nicht die elektrischen Ströme ähnliche Wirkungen zeigen? Von diesem ganz neuen Gesichtspunkte aus scheint Ampère überhaupt seine Untersuchungen begonnen zu haben; denn schon am 18. September 1820 konnte er mittheilen, dass gleichgerichtete galvanische Ströme einander anziehen, entgegengesetzt gerichtete aber einander abstossen. Damit waren einerseits allerdings die Wirkungen ruhender wie strömender Elektricität einander ähnlicher, andererseits aber auch wieder unähnlicher geworden, denn bei der ersteren wirken gleiche Qualitäten abstossend, hier aber wirken gleichbewegte Qualitäten anziehend auf einander. Ampère hielt für angemessen[2]), die beiden Gebiete der Elektricität gänzlich zu tren-

---

[1]) André Marie Ampère wurde am 22. Januar 1775 in Lyon geboren, seine Eltern zogen sich aber bald, nachdem sie ihr Geschäft aufgegeben, auf eine kleine Besitzung zu Poleymieux-les-Mont-d'Or bei Lyon zurück. Hier war der Knabe viel auf sich selbst angewiesen und versuchte seinen Wissensdurst durch das Studium des grossen Dictionnaire von D'Alembert und Diderot zu stillen, dessen 20 Bände er gründlich und ohne Auslassung durcharbeitete. Die Hinrichtung seines Vaters als „Aristokrat“ liess ihn ein Jahr lang in geistige Apathie fallen, dann aber regte ihn die Botanik und das Studium lateinischer Dichter vor Allem an. Um sich eine Lebensstellung zu sichern, wurde Ampère 1796 Privatlehrer der Mathematik in Lyon, studirte dabei aber in freien Stunden auch die Chemie von Lavoisier. Im December 1807 erhielt er den Lehrstuhl der Physik an der Centralschule zu Bourg, bald darauf wurde er Repetent und dann Professor an der polytechnischen Schule in Paris. Von 1800 bis 1820, wo seine elektrischen Untersuchungen begannen, beschäftigte er sich viel mit mathematischen Arbeiten über Wahrscheinlichkeitsrechnung, über Variationsrechnung u. s. w. Ampère starb am 10. Juni 1836 auf einer Reise in Marseille. Arago weiss in seiner Biographie Ampère's (Werke II, S. 3) bei aller Anerkennung von dessen Genialität doch viel von seiner Zerstreutheit, seiner Neigung zu Extremen, seinen phantastischen Ideen, seinen sonderbaren Eigenheiten im gesellschaftlichen Umgange zu erzählen. Die Nachwelt hat längst die erstere mehr betont und die letzteren mehr vergessen als der College des berühmten Akademikers. Manches scheinbar Phantastische in den Ansichten Ampère's hat auch später viel mehr Realität gezeigt, als Arago ihm zutraute, und die Vertheidigung Geoffroy St. Hilaire's und der Entwickelungstheorie der Organismen gegenüber den Ansichten Cuvier's wird heute mit ganz anderen Augen angesehen als zu Arago's Zeiten.

[2]) Exp. relat. à de nouveaux phénomènes électro-dynamiques, Ann. de chim. et de phys. XX, p. 60, 1822. „Le nom d'électro-magnétique, donné aux phénomènes produits par les fils conducteurs de la pile Volta, ne pouvait les désigner convenablement qu'à l'époque où l'on ne connaisait que ceux de ces phénomènes qu'a découverts M. Oersted entre un courant électrique et un aimant. J'ai cru devoir employer la dénomination d'électrodynamiques pour réunir sous un nom commun tous ces phénomènes, et spécialement pour désigner ceux que j'ai observés entre deux conducteurs voltaiques.“

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

nen und zu dem Zwecke mit zwei verschiedenen Namen, der Elektrostatik und der Elektrodynamik zu bezeichnen. Zur Beobachtung der Wirkungen galvanischer Ströme auf einander construirte Ampère mehrere neue Apparate. Gleich in seiner ersten Abhandlung von 1820 beschrieb er die Drahtrechtecke und Drahtkreise, die mit ihren Enden in Quecksilbernäpfe tauchen, in welche der Strom eingeleitet und von welchen er abgeleitet wird, und gab zur Befestigung dieser Quecksilbernäpfe das nach ihm benannte Stativ, wenn auch noch in unbequemer Form. Ebenso wickelte er schon zur Verstärkung der Wirkungen den Leitungsdraht statt zu einem einzigen Kreis zu einer Spirale auf und kam so zu der elektrodynamischen Schraube, wie man in Deutschland sagte, oder zu dem Solenoid, wie Ampère in den Abhandlungen von 1822 den Apparat nannte. Diese leicht beweglichen Apparate zeigten nun nicht bloss die gegenseitige Einwirkung von Strömen auf einander, sondern auch die vollständige Reciprocität der Wirkungen von elektrischen Strömen und Magneten. Wie die Magnetnadel durch den galvanischen Strom, so wurden auch die Drahtrechtecke durch den Magnet abgelenkt, und zwar zeigte sich auch hier, wie bei den Oersted'schen Versuchen, die Transversalität der wirkenden Kräfte[1]. Die Drahtrechtecke bewegten sich wie Magnete, deren Achse senkrecht zur Ebene der Rechtecke liegt, und die neuen Solenoide zeigten sich ganz als künstliche Magnete, indem ihre Längenachse (da sie senkrecht zur Richtung der Ströme) mit der magnetischen Achse zusammenfiel. Ampère schloss daraus, dass die ungeheuerliche Vorstellung von der Erde als eines einzigen permanenten Stahl- oder Eisenerzmagneten aufgegeben werden könne, und dass man dieselbe nur für ein Solenoid, für umflossen von einem galvanischen Strome, der die Richtung von Ost nach West habe, anzusehen brauche. Danach war aber die Vorstellung von besonderen magnetischen Flüssigkeiten oder Kräften überhaupt eliminirt, und jeder Magnet war danach als ein natürliches Solenoid, als ein indifferenter, nur durch die ihn umfliessenden Ströme wirkender Eisenkern zu erklären; oder (da man schon lange die Zusammensetzung der Magnete

[1]) Die vollkommene Transversalität der Wirkungen war bei Oersted noch nicht rein hervorgetreten, weil dieser die Wirkungen des Erdmagnetismus noch nicht ausschloss. Ampère bewerkstelligte das letztere im Jahre 1820 dadurch, dass er die Magnetnadel an eine Achse befestigte, deren Richtung mit der magnetischen Achse der Erde zusammenfiel. Biot und Savart hatten bei ihren Versuchen im Jahre 1820 die Wirkung des Erdmagnetismus durch einen unter die Nadel gelegten Magneten compensirt. Ampère vereinigte im Jahre 1821 die beiden Magnete, indem er zwei Magnetnadeln parallel, aber mit entgegengesetzten Polen über einander auf einer messingenen Achse befestigte. (Déscript. d'un appareil électro-dynam., Ann. de chim. et de phys. XVIII, 1821). Nobili vereinigte 1825 Ampère's astatische Nadel mit dem Multiplicator und machte diesen dadurch zu dem anerkannt besten Galvanometer. (Biblioth. univers. XXIX, S. 119, 1825, übersetzt in Schweigger's Journ. XLV, S. 249, 1825.)

Elektromagnetismus. c. 1820 bis c. 1830.

aus Molecularmagneten als nothwendig eingesehen hatte) jeder Magnet war zu begreifen als unmagnetisches Metall, dessen Molecüle alle von gleichgerichteten, galvanischen Strömen umkreist wurden.

Dabei aber kam bald eine neue Schwierigkeit zum Vorschein. Werden die Molecularströme bei der Magnetisirung in einem Metalle erst erzeugt, oder sind sie in allen magnetisirbaren Metallen schon immer vorhanden? Ampère nahm anfänglich das Erste an, kam aber bald zu der Ansicht, dass auch das Zweite möglich sei. Dann würden in unmagnetischem Eisen, Nickel oder Kobalt die vorhandenen Molecularströme nur verschieden gerichtet sein, sich in ihren Wirkungen nach aussen aufheben, und das Magnetisiren dieser Metalle würde in nichts Anderem, als in der parallelen Einstellung dieser Molecularströme bestehen [1]. Ampère ist später nicht wieder auf dieses Thema eingegangen, nach Muncke [2], weil er einen Entscheid zwischen den beiden Ansichten bei der Unkenntniss von dem eigentlichen Wesen der Elektricität überhaupt noch nicht für möglich hielt.

Wahrscheinlich hängt dies zusammen mit der kühlen Aufnahme von anderen Versuchen, die Ampère um dieselbe Zeit bekannt machte. Wenn in unmagnetischem Eisen keine elektrischen Ströme fliessen, sondern dieselben erst durch das Magnetisiren hervorgerufen werden, so beweist die Magnetisirung durch galvanische Ströme sicher, dass diese letzteren in benachbarten Leitern oder wenigstens in genähertem Eisen andere galvanische Ströme hervorrufen können. Die magnetische Induction ist dann ein directer Beweis für die galvanische Induction und die Beobachtung der letzteren umgekehrt ein Beweis für die Richtigkeit der ersten Ampère'schen Vorstellung vom Magnetisiren. Ampère berichtete am 4. September 1822 der Pariser Akademie [3], dass er einen in sich geschlossenen Kupferstreifen an einem Faden innerhalb des kreisförmigen Schliessungsdrahtes eines Stromes aufgehängt habe. Wenn er dann dem Kupferstreifen einen Hufeisenmagnet näherte, so wurde dieser, je nach der Richtung des Stromes, angezogen oder abgestossen. Ampère schloss daraus, dass ein elektrischer Strom in leitenden Körpern, neben denen er vorbeigeht, wieder Elektricität hervorruft. Die zeitgenössischen Physiker waren indess mit dieser Schlussfolgerung keineswegs einverstanden. Muncke [4] hielt für sehr wahrscheinlich, dass bei diesem Versuche eine Täuschung stattgefunden, dass der Kupferdraht ähnliche

---

[1]) Recueil d'observations électro-dynamiques, Paris 1822. Vergl. Wiedemann, die Lehre von der Elektricität III, S. 96 und Hoppe, Geschichte der Elektricität, S. 230.

[2]) Gehler's physik. Wörterb., 2. Aufl. III, S. 614.

[3]) Recueil d'observ. électro-dyn., Paris 1822. Albrecht, Geschichte der Elektricität, S. 220.

[4]) Gehler's physik. Wörterb., 2. Aufl. III, S. 593.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

Erscheinungen gezeigt habe, als von ihm bei der Prüfung dieser Angabe an einem etwas eisenhaltigen Messingdrahte beobachtet worden seien, dass also die beobachteten Wirkungen nicht von elektrischen Strömen, sondern von Eisen im Kupferstreifen herrührten.

Dabei beruhigte sich Ampère und beschäftigte sich nun vorzugsweise mit der mathematischen Theorie der Elektrodynamik [1]. Ampère nimmt an, dass die Wirkung zweier Stromelemente auf einander ihren Längen $ds$ und $ds'$, ihren Stromintensitäten $i$ und $i'$ direct, einer beliebigen Potenz $r^n$ der Verbindungslinie ihrer Mittelpunkte indirect proportional ist, dass die Wirkung in dieser Linie geschieht und dass solche elektrodynamische Wirkungen sich wie alle Kraftwirkungen nach dem Parallelogramm der Kräfte zerlegen oder zusammensetzen lassen. Durch eine solche Zerlegung findet er dann für die Wirkung zweier Elemente $ds$ und $ds'$, die mit $r$ die Winkel $\vartheta$ und $\vartheta_1$ und deren mit $r$ resp. bestimmte Ebenen den Winkel $\eta$ bilden, die Formel

$$I = \frac{i.i'.ds.ds'}{r^n}(K \cos\vartheta \cos\vartheta_1 + \sin\vartheta \sin\vartheta_1 \cos\eta)$$

oder auch, wenn der Winkel der Elemente selbst mit $\varepsilon$ bezeichnet wird,

$$I = \frac{i.i'.ds.ds'}{r^n}[\cos\varepsilon - (K-1)\cos\vartheta \cos\vartheta_1].$$

Durch besondere Versuche über die Wirkung von geschlossenen Kreisströmen auf einander und auf Stromelemente bestimmte Ampère auch noch die unbekannten Constanten $n = 2$ und $K = -\,^1/_2$, und kam so zu der Gleichung

$$I = \frac{i.i'ds.ds'}{r^2}\left(\cos\varepsilon - \tfrac{3}{2}\cos\vartheta \cos\vartheta_1\right)$$ [2].

Diese Formel ist bis heute die Grundlage für die mathematische Theorie der Elektrodynamik geblieben, wie überhaupt die ganze Theorie des Magnetismus und Elektromagnetismus noch heute im Sinne von Ampère durchgeführt wird. Dafür zeugen wieder Maxwell's Worte in seinem berühmten „Lehrbuch der Elektricität“ (Berlin 1883 II, S. 216): „Ampère's Untersuchungen, durch die er die Gesetze der mechanischen Wirkung elektrischer Ströme auf einander begründete, gehören zu den glänzendsten Thaten, die je in der Wissenschaft vollbracht worden sind. Theorie und Experiment scheinen in voller Macht und Ausbildung dem Hirn des „Newton der Elektricität“ entsprungen zu sein. Seine Schrift (Théorie des Phénomènes etc.) ist in der Form vollendet, in der

---

[1]) Théorie des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience, Mém. de l'acad. VI, 1823, erschienen 1827.

[2]) Die erste allgemeine Formel mit der Relation $K = \frac{1-n}{2}$ theilte Ampère schon am 10. Juni 1822 der Pariser Akademie mit. Ann. de chim. et de phys. XX, p. 398, 1822.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

Präcision des Ausdrucks unerreichbar und ihre Bilance besteht in einer Formel, aus der man alle Phänomene, welche die Elektricität bietet, abzuleiten vermag, und die in allen Zeiten als Cardinalformel der Elektrodynamik bestehen bleiben wird."

Trotzdem schien es im Anfange wenigstens, als ob andere Theorien des Elektromagnetismus und der Elektrodynamik, an denen es nicht fehlte, bessere Aussichten hätten als die von Ampère. Oersted und Faraday hatten noch vor Ampère ähnliche, aber unvollkommenere Theorien wie dieser aufgestellt. Oersted hatte gleich in seiner ersten Schrift vom Jahre 1820, und bestimmter in Schweigger's Journal (Bd. XXXII und XXXIII) ausgesprochen, dass die beiden Arten von Elektricitäten bei ihrer entgegengesetzten Richtung in elektrischen Leitern gegen einander aufwirbeln und danach in Schraubenlinien sich bewegen müssten. Da nun die positive Elektricität dabei den Südpol des Magneten, die negative Elektricität aber den Nordpol zurückstossen sollte, so folgte daraus leicht die Erklärung des elektromagnetischen Grundphänomens, die transversale Richtung der Nadel zum Strom. Faraday[1]) hatte entdeckt, dass ein bewegter Stromleiter um einen festen Magneten in Umdrehungen geräth, deren Richtung von der Stromesrichtung und der Polarität des Magneten abhängt. Er nahm danach zur Erklärung der elektromagnetischen Grunderscheinung an, dass die magnetischen wie die elektrischen Flüssigkeiten um die Leiter rotirten. Indessen kam er damit nicht weit, und bald wurde auch gezeigt, dass alle die nach Faraday so vielfältig beobachteten Rotationserscheinungen sehr wohl nach Ampère's Theorie zu erklären seien.

Die Abneigung der Physiker gegen Ampère's Theorien gründete sich vor Allem auf die Elimination der magnetischen Flüssigkeiten. Biot, der ein sehr feines Gefühl für alle Momente hatte, welche den herrschenden Systemen der Physik, den physikalischen Grundanschauungen gefährlich werden konnten, tadelt in seinem Lehrbuche (III, S. 194), dass Ampère zu der Annahme gegriffen habe, dass alle gegenseitigen Wirkungen magnetisirter Körper durch Volta'sche Ströme hervorgebracht werden, welche die metallischen Theilchen umkreisen, fast nach Art der Descartes'schen Wirbel; woraus dann eine solche Verwickelung der Anordnungen und Annahmen hervorgehe, dass die Hypothese fast keiner Darstellung fähig sei. Biot bleibt dabei, dass auch die elektromagnetischen Wirkungen rein magnetische sind, dass der Kupferdraht durch den Strom, der ihn durchfliesst, wirklich zum Magneten wird. Nach Muncke[2]) (Gehler III, S. 643 ff.) kann man

---

[1]) Quarterly Journal of Science XII, 1822, datirt vom 11. Sept. 1821; auch Gilbert's Ann. LXXI, 124, 1822.

[2]) Georg Wilhelm Muncke, 1772 bis 1847, seit 1817 Professor der Physik in Heidelberg.

sich das folgendermaassen anschaulich machen: Die Elektricität durchströmt die Leiter nicht als ein Continuum, sondern in einzelnen Pausen, die bei der galvanischen Elektricität am merkbarsten sind und sich den Nerven durch das merkwürdige Simmern anzeigen; jede hinreichend starke Welle trennt aber den in dem Leiter und seiner Umgebung vorhandenen neutralen Magnetismus in seine beiden polaren Theile, so dass die nordmagnetische Flüssigkeit an der einen, die südmagnetische an der anderen Seite des Leiters sich ansammelt. Wie dem aber auch sei, da der Magnetismus des galvanischen Stromes jedenfalls transversal zu der Richtung des Stromes wirkt, so hält Biot dafür, dass in jedem Querschnitte des Leiters die Magnetismen getrennt werden und zwar so, dass jeder Querschnitt auf ein äusseres magnetisches Theilchen so wirkt, als ob die Tangenten des Querschnittes aus lauter magnetischen Nadeln beständen. Daraus leitete er dann auch die elektrodynamischen Anziehungen und Abstossungen jener Ströme selbst ab. Denken wir uns für einen Querschnitt des Stromes vier solcher Tangentialnadeln construirt, so wird für einen Querschnitt eines gleich gerichteten Stromes die Figur dieselbe bleiben, für einen entgegengesetzt gerichteten Strom aber auch die entgegengesetzte Lage erhalten. Die beiden nebenstehenden Abbildungen, welche Biot's Lehrbuch (Bd. III, Taf. XI) entnommen sind, zeigen dann deutlich, wie die ersten Ströme sich anziehen, die zweiten aber sich abstossen müssen. Biot ist des Erfolges seiner Sache und des Unterganges der Ampère'schen Hypothese so sicher, dass er am Schlusse des betreffenden Abschnittes in seinem Lehrbuche der Experimentalphysik (Bd. III, S. 196) sagt: „Wenn, wie ich nicht anders erwarte, die Physiker in Kurzem die verschiedenen Hypothesen wieder aufgeben werden, die man über den Elektromagnetismus aufgestellt hat, um zu der so einfachen Ansicht einer Molecularmagnetisirung zurückzukehren, so werden sie mir hoffentlich das Zeugniss nicht versagen, dass ich diese grosse Klasse von Erscheinungen nie aus einem anderen Gesichtspunkte aufgefasst habe". Indessen trotz dieser Sicherheit kam die Sache doch anders, und die Physiker fanden auch in der Theorie des Transversalmagnetismus bedeutende Schwierigkeiten. G. G. Schmidt[1]) meinte, dass der Magnetismus im Querschnitt des Stromleiters sich so vertheile, dass die eine Hälfte nord-, die andere südmagnetisch werde. v. Althaus[2]) behauptete dagegen, der Querschnitt des Leiters müsse vier magnetische Pole durch den Strom erhalten, von denen je zwei gleiche sich gegenüber lägen. J. J. Prechtl[3]) nahm an, dass jede Seite

[1]) Gilbert's Ann. LXXI, S. 394, 1822.

[2]) Versuche über den Elektromagnetismus, Heidelberg 1821.

[3]) Gilbert's Ann. LXVIII, S. 203, 1821.

in dem Umfange des Querschnittes polarisch würde. Seebeck[1]) und danach G. T. Pohl[2]) lehrten, dass jeder Punkt des Querschnittes zugleich Nord- und Südmagnetismus besitze, die beide, nur nach verschiedenen Richtungen, durch diesen Punkt hindurchströmten. Mit dieser Circularpolarität (wie Pohl sie nennt) war man aber so ziemlich wieder bei den Ampère'schen Spiralströmen angelangt, und dass man danach zweierlei, elektrische und magnetische Ströme, beibehielt, war überflüssig. So hat man sich auch weiterhin mit den ersteren allein begnügt und die Ampère'sche Theorie, die schliesslich allen Beobachtungen zu entsprechen vermochte, beibehalten, trotzdem auch sie starke Anforderungen an das Anschauungs- und Erkenntnissvermögen stellt.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

Die Vorstellung, dass alle elektrischen Leiter wenigstens neutralen Magnetismus enthalten und danach auch unter gewissen Umständen der Magnetisirung fähig seien, machte sich noch an anderer Stelle in merkwürdiger Weise geltend und hinderte da einen zweiten Anlauf zur Constatirung der galvanischen Induction. Arago theilte im November 1824 der französischen Akademie[3]) Versuche mit, nach denen die Schwingungen einer frei aufgehängten Magnetnadel bedeutend verlangsamt oder gedämpft werden, wenn man unter dieselbe Platten oder Ringe aus Kupfer oder anderen leitenden Metallen bringt. Am 7. März 1825 konnte er die umgekehrten, aber noch überraschenderen Versuche beschreiben[4]), wonach die ruhende Magnetnadel, wenn man die Platte unter oder über ihr in Rotation setzte, nach der Richtung der Rotation hin abgelenkt wurde oder, wenn die Rotation der Platte schnell genug war, selbst mit zu rotiren anfing. Die Physiker, welche diese Versuche wiederholten, wie Seebeck, Nobili und Andere, nahmen dieselben für einen Beweis, dass die Nadel auch in jenen Metallen Magnetismus inducire. Als aber Arago bemerkte[5]), dass eine an einer Wage aufgehängte und äquilibrirte Magnetnadel von der rotirenden Metallscheibe nicht angezogen, sondern abgestossen werde, da musste man wieder eine besondere Art von Magnetismus in der letzteren annehmen. Dieser Art von Magnetismus gab Arago den Namen Rotationsmagnetismus, weil derselbe nur in der rotirenden, nicht in der ruhenden Scheibe sich wirksam zeigte. Aus diesem Begriff des Rotationsmagnetismus liess sich dann zur Noth auch die Beobachtung Herschel's und Babbage's[6]) erklären, dass eine mit radialen Einschnitten versehene Scheibe gegen eine massive in ihren Wirkungen stark geschwächt erscheint.

---

[1]) Abhandl. der Berl. Akad. 1820 bis 1821, S. 289.
[2]) Gilbert's Ann. LXXIV, S. 389 bis 409, 1823.
[3]) Annales de chimie et de physique XXVII, p. 363, 1824.
[4]) Ann. de chim. et de phys. XXVIII, p. 325, 1825.
[5]) Ibid. XXXII, S. 213, 1826; Pogg. Ann. VII, S. 385, 1826.
[6]) Phil. Trans. 1825, S. 481.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

Eine andere merkwürdige Art von Magnetismus, den Thermomagnetismus, hatte Seebeck[1]) im Jahre 1821 entdeckt. Die Verfolgung der Versuche Oersted's hatten Seebeck auf die Vermuthung geleitet, dass auch ohne Mitwirkung eines feuchten Zwischenleiters die blosse Berührung zweier Metalle im elektrischen Kreislauf Magnetismus erzeugen könnte; eine Idee, auf die ihn auch Volta's Fundamentalversuch von der durch trockene Berührung zweier Platten hervorgebrachten Contactelektricität hätte führen können[2]). Er legte eine Wismuthscheibe unmittelbar auf eine Kupferscheibe und brachte dieselben zwischen die Enden eines Multiplicatordrahtes. Wenn er dann mit der Hand diese Enden gegen die Scheiben drückte, so wich die Magnetnadel jedesmal um einige Grade ab. Dass dabei die Feuchtigkeit der Hand nicht das wirkende Element war, erkannte Seebeck daraus, dass keine Wirkung erfolgte, wenn das Ende des Drahtes mit Hülfe nasser Pappe gegen die Scheibe gedrückt wurde. Da aber bei längerem Andrücken mit Hülfe von einer Glasscheibe und von Metallstangen die Abweichung der Nadel eintrat, so kam Seebeck zu dem glücklichen Gedanken, dass die Wärme der Hand das wirkende Element und die Temperaturdifferenz an den Berührungsstellen des metallischen Kreises die eigentliche Quelle des freiwerdenden Magnetismus, die Ursache der magnetischen Wirkungen sei[3]). Seebeck dachte bei diesen Vorgängen, wie das in der Zeit lag, vor Allem an den sich direct anzeigenden Magnetismus, der ja nach damaligen Vorstellungen neben der Elektricität in dem Drahte erregt werden musste, und beschrieb die Erscheinungen unter dem Namen Thermomagnetismus[4]). Ein Name, der nach der Entdeckung der galvanischen Inductionen und der damit zusammenhängenden Annahme der Ampère'schen Theorie natürlich endgültig durch den entsprechenderen Thermoelektricität ersetzt wurde. Seebeck selbst beobachtete noch mehrere Eigenthümlichkeiten der neuen Elektricitätsquelle. Er fand die gleiche magnetische Polarisation, wenn er die Berührungsstelle der Metalle, statt zu erwärmen, abkühlte. Er bemerkte, dass die Intensität der erzeugten Polarisation im Allgemeinen mit der Temperaturdifferenz, aber nicht proportional derselben zunimmt, dass die Intensität auch von der Beschaffenheit der angewandten Metalle abhängt, von ihrer Natur sowohl, wie von ihrer krystallographischen Structur, und dass mehrere verbundene thermomagne-

---

[1]) Thomas Johann Seebeck (9. April 1770 Reval — 10. December 1831 Berlin) ebte, nachdem er Medicin studirt, längere Zeit als Privatmann in Jena, Bayreuth und Nürnberg und wurde 1818 Mitglied d. Berl. Akademie.

[2]) Gehler's physik. Wörterb., 2. Aufl., VI, S. 711.

[3]) Ibid. VI, S. 712.

[4]) Gilbert's Ann. LXXIII, S. 115, 430, 1823. Abhandlungen der Akademie der Wissensch. zu Berlin, 1822 bis 1823 (erschienen 1825), S. 265 bis 374: Magnetische Polarisation der Metalle durch Temperaturdifferenz.

tische Paare in ihren Wirkungen sich verstärken, aber wieder nicht proportional ihrer Anzahl. Schliesslich erklärte er auch den Magnetismus der Erde für Thermomagnetismus, hervorgerufen durch die erhitzende Wirkung der Vulkane auf zusammenhängende Lager von Metallen und Erzen, welche Gürtel um die Erde bilden.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

Die ersten Bestätigungen erhielten Seebeck's Angaben durch Yelin[1]) in München, sowie durch Oersted und Fourier[2]), welche Letztere ihre Versuche noch vor Veröffentlichung der Seebeck'schen Arbeiten bloss auf mündliche Nachrichten hin begannen. Sie suchten dabei vor Allem den Einfluss der Zusammenstellung mehrerer Seebeck'scher Paare auf die Menge der entwickelten Elektricitäten zu erkennen. Indem sie zu dem Zwecke eine Thermosäule (die erste) zusammenstellten, fanden sie, dass bei ganz kurzer Leitung die Wirkung nicht, dagegen bei Anwendung eines Multiplicators beträchtlich vermehrt werde. Sie schlossen daraus, dass bei den thermoelektrischen Elementen die Quantität grösser, aber die Spannung noch kleiner sei als bei den Volta'schen Elementen. Auch chemische Wirkungen bemerkten sie an ihrer Säule, wenigstens die Zersetzung von Kupfersalzen. Sie schlugen danach vor, die Erscheinungen mit dem Namen thermo-elektrische zu bezeichnen. Seebeck widersetzte sich noch zwei Jahre später in Poggendorff's Annalen (Bd. VI) dieser Aenderung und hielt an dem Namen thermo-magnetisch fest. Indessen zeigten doch die Säulen selbst immer mehr ihre gewöhnliche elektrische Natur, und im Jahre 1836 gelang es sogar Antinori und Linari[3]), mit 25 Wismuth-Antimonelementen elektrische Funken zu erhalten.

So erzwang die Elektricität nach und nach von selbst die Vorstellung von der Umwandlung der Kräfte, nicht von einem blossen Hervorrufen, einem Auslösen der einen Kraft durch eine andere, sondern von einem directen Uebergange einer Kraftform in eine andere. Merkwürdiger Weise blieb dabei immer noch der Gedanke einer Reciprocität dieser Verwandlungen ein unklarer, ja wurde in einzelnen Fällen sogar seiner Möglichkeit nach angezweifelt. Seebeck erkannte, dass sowohl Temperaturerhöhungen wie Temperaturerniedrigungen elektrische Ströme hervorzurufen vermögen; erst 13 Jahre später aber zeigte Peltier[4]), dass man auch umgekehrt durch elektrische Ströme nicht bloss Wärme, sondern auch Kälte erzeugen könne. Peltier lehrte im Jahre 1834[5]),

---

[1]) Gilbert's Annalen LXXIII, S. 415, 1823.

[2]) Oversigt over det kongl. Danske Videnskabernes Selskabs Forhandl. 1822 u. 1823. Ann. de chim. et de phys. XXII, p. 375, 1823.

[3]) Poggendorff's Annalen XL, S. 644, 1837.

[4]) Jean Charles Anathase Peltier (22. Februar 1785 Ham, Départ. de la Somme — 27. October 1845 Paris) war bis 1815 Uhrmacher in Paris und lebte später als Privatmann wissenschaftlichen Arbeiten ergeben.

[5]) Ann. de chim. et de phys. LVI, 1834. Pogg. Ann. XLIII, S. 324, 1838.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

dass die Wärme, welche der elektrische Strom in einem homogenen Theile des Schliessungsdrahtes erzeugt, überall dieselbe ist, an den Endpunkten dieses Theiles aber von der Beschaffenheit der angrenzenden Theile abhängt. Wenn ein Antimon- mit einem Kupferstabe zusammengelöthet und der Strom durch diesen Stab vom Antimon zum Kupfer geleitet wurde, so fand an der Löthstelle eine Erwärmung um 10°, bei der entgegengesetzten Stromrichtung aber eine Abkühlung um 5° statt. Ging der Strom von Wismuth zu Antimon, so wurde die Temperatur der Löthstelle um 37° erhöht, umgekehrt aber gar um 45° erniedrigt [1]). Dieses Peltier'sche Phänomen wurde bald von Lenz [2]) bestätigt, der sogar Wasser durch die Peltier'sche Kälte zum Gefrieren brachte. Die Gesetze der Erscheinungen gaben Becquerel, Quintus Icilius und Frankenheim.

Je mehr aber der Galvanismus sich flüssig in seiner Natur, vielfach in seinen Wirkungen zeigte, desto mehr musste nach und nach die Frage nach den quantitativen Verhältnissen dieser Wirkungen sich aufdrängen und an Wichtigkeit gewinnen. Solche Aeusserungen naiver Verwunderung über die Veränderungen der Wirksamkeit der Batterien bei verschiedener Zahl, Grösse und Anordnung der Elemente, wie wir sie in dieser Zeit noch bei vielen Physikern finden, konnten nur ohne weitere Folgen bleiben, so lange noch das Neue der Wirkungen des Galvanismus ganz gefangen nahm. Weniger befangene, kühner blickende Geister aber mussten sich auch da schon die Frage nach den Grössenverhältnissen der Wirkungen und nach dem quantitativen Aufwande des Galvanismus bei seiner Verwandlung in andere Kräfte vorlegen. Der Erste, welcher mit Erfolg dies that, war G. S. Ohm [3]), der allerdings dem allgemeinen Gefühle seiner Zeitgenossen, wie auch dem Zustande der Hülfsapparate noch um ein gutes Stück vorauseilte. Schon vielfach hatte man bemerkt, dass die Wirkung einer galvanischen Batterie nicht bloss von dieser selbst, sondern auch von dem Leitungsdrahte abhängt, welcher den Kreis zwischen den Polen des Elementes schliesst. Davy [4]) constatirte durch Beobachtung der chemischen Wirkungen des Stromes, dass ein metallischer Schliessungsdraht dem galvanischen Strome einen Widerstand entgegensetzt, welcher von der Qualität des Metalles abhängt und seiner Länge direct, seinem

---

[1]) Diese Richtungen des Stromes sind von Peltier, vermuthlich durch einen Druckfehler, falsch angegeben worden. (Pogg. Ann. XLIII, S. 326.)

[2]) Pogg. Ann. d. Physik XLIV, S. 342, 1838.

[3]) Georg Simon Ohm (nicht zu verwechseln mit seinem Bruder Martin Ohm, dem bedeutenden Mathematiker) ist am 16. März 1787 in Erlangen geboren und war folgeweise Lehrer in Nidau, Neufchâtel, Bamberg, Köln (1817 bis 1826), an der Kriegsschule in Berlin (1826 bis 1833) und an der polytechnischen Schule in Nürnberg (1833 bis 1849). 1849 wurde der 62jährige Gelehrte Extraordinarius an der Universität München, 1852 Ordinarius, welche Würde er noch zwei Jahre bis zu seinem Tode, der am 7. Juli 1854 erfolgte, bekleidete.

[4]) Phil. Trans. 1821, S. 433. Gilbert's Annalen LXXI, S. 252, 1822.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

Querschnitte umgekehrt proportional ist[1]). Auch Ohm bemühte sich, wie noch mehrere Physiker dieser Zeit, zuerst um dieses specielle Problem und gab[2]) im Jahre 1825 eine Reihe der Metalle nach ihrer Leitungsfähigkeit. Im folgenden Jahre[3]) aber folgte schon die Angabe des genauen Zusammenhanges zwischen elektromotorischer Kraft, Intensität und Widerstand. Gleich bei seiner ersten Arbeit hatte Ohm bemerkt, dass die Stromstärke einer galvanischen Kette nach dem Schliessen schnell bis zu einem Minimum abnimmt und sich beim Oeffnen wieder bis zu einem gewissen Grade erholt. Diese Unbeständigkeit, dieses Wogen der Kraft hinderte aber eine genaue Beurtheilung ihrer selbst, wie der Einwirkung anderer Factoren auf dieselbe, und Ohm griff darum nach Poggendorff's Vorschlag mit Freuden zum Thermoelement, das, wie die Versuche zeigten, constante Ströme lieferte. Indem er einen Wismuthstab zwischen zwei Kupferdrähte löthete, die eine Löthstelle mit Eis umhüllte, die andere in kochendes Wasser brachte und verschiedene Schliessungsdrähte einschaltete, gelangte er zu der Formel $X = \frac{a}{b + x}$, „wo $X$ die Stärke der magnetischen Wirkung auf den Leitern, deren Länge $x$ ist, $a$ und $b$ aber constante, von der erregenden Kraft und dem Leitungswiderstande der übrigen Theile der Kette abhängige Grössen bezeichnen[4])". Wieder ein Jahr später fasste Ohm seine Untersuchungen in einem eigenen Werke, „Die Galvanische Kette, mathematisch bearbeitet von Dr. G. S. Ohm" (Berlin 1827), zusammen und leitete darin sein Gesetz nun auch theoretisch ab. Ohm denkt sich zu dem Zwecke den elektrischen Strom als wirklichen Strom. Seine Wirkung hängt dann ab von der Geschwindigkeit des Fliessens; diese ist beim gewöhnlichen Flusse durch die Neigung, beim elektrischen Strome durch die Spannungsdifferenz auf einer bestimmten Strecke, an den Enden der Längeneinheit bedingt. Ohm bezeichnet diese Spannungsdifferenz wie beim Wasserstrome mit dem Namen Gefälle. Da nun, wie die Experimente gezeigt hatten, die Stromintensität

---

[1]) Die Abhandlungen Davy's (es sind ihrer zwei) in den Philosophical Transactions for 1821 sind auch dadurch wichtig, dass er in ihnen wieder Untersuchungen über den galvanischen Lichtbogen und vor allem die Abstossung desselben durch den Magneten beschreibt. Er beschäftigte sich da weiter mit der Leitungsfähigkeit der Körper für Elektricität und ordnete die Metalle nach dieser Leitungsfähigkeit in die Reihe: Silber, Kupfer, Blei, Gold, Zink, Zinn, Platin, Palladium, Eisen. Arbeiten über das specifische Leitungsvermögen der Metalle waren übrigens schon Anfang des Jahrhunderts veröffentlicht worden, und Ritter hatte in seiner vorschnellen Weise sogar schon das falsche Gesetz aufgestellt: Das Leitungsvermögen der Metalle für Elektricität steht im geraden Verhältnisse zu ihrer Oxydabilität. (Gehler's Wörterb. VI, S. 155 bis 185.)

[2]) Schweigger's Journal XLIV, S. 110, 1825.

[3]) Ibid. XLVI, S. 137, 1826.

[4]) Ibid. XLVI, S. 151.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

in einem homogenen Leiter überall gleich ist, so muss dies auch mit dem Gefälle der Fall sein und somit ist das Gefälle, einen homogenen Schliessungsdraht vorausgesetzt, der Spannungsdifferenz in der Kette selbst, d. h. der elektromotorischen Kraft proportional. Doch hängt das Gefälle nicht davon allein, sondern auch von der Länge der Strecke ab, auf welche die Spannungsdifferenz sich vertheilt, und ist dieser Strecke jedenfalls umgekehrt proportional. Die Stromintensität $i$ muss also der elektromotorischen Kraft $e$ direct, der Länge des Stromkreises $l$ indirect proportional, und $i$ muss bei richtig gewählten Maasseinheiten gleich dem Quotienten $\frac{e}{l}$ sein. Da der Stromkreis nie ganz homogen, sondern in seinem Widerstande verschieden ist, so wird er auch verschiedenen Einfluss auf das Gefälle üben. Indessen lässt sich jeder Widerstand mit dem eines Drahtes vergleichen und durch diesen ersetzen, dies wird vor Allem für den Widerstand im Elemente nöthig sein; bezeichnen wir den reducirten Widerstand des letzteren mit $w$ und den des obigen Stromkreises nun mit $l$, so ist $i = \frac{e}{w + l}$. Aus dieser Formel leitete dann Ohm nicht bloss die merkwürdigen Gesetze der Wirkungen galvanischer Batterien bei verschiedenem äusseren Widerstande ab, sondern gab auch eine Theorie des Multiplicators [1]).

In Deutschland und bei den mit deutschen Gelehrten in Verbindung stehenden auswärtigen Physikern fanden Ohm's Arbeiten eine ganz gute Aufnahme. Berzelius sagte 1828 [2]): „Wenn auch manche von den Resultaten, zu denen Ohm gelangt ist, künftig nicht als vollkommen befriedigend betrachtet werden können, so ist doch der Versuch, hierin unsere Kenntniss auf gleich sicheren Fuss, wie die Kenntniss der Gesetze der Schwere und der Bewegung zu bringen, ein verdienstvolles Unternehmen". Fechner bestätigte im Jahre 1831 [3]) das Ohm'sche Gesetz durchaus und verwerthete dasselbe experimentell wie theoretisch in manchen Beziehungen weiter. Im Auslande hingegen, Frankreich und England vor Allem, lernte man dasselbe lange Zeit nicht kennen oder nahm wenigstens keine Notiz davon. Poggendorff zeigte noch 1839 [4]), wie man manche mühsam auf experimentellem Wege erhaltenen Resultate über die Wirkung galvanischer Batterien aus dem Ohm'schen Gesetze ohne Weiteres hätte ableiten können, und fuhr dann fort: „Da indessen diese Theorie selbst bei uns noch lange nicht die Anerkennung gefunden hat, die sie wegen ihrer Unentbehrlich-

[1]) Weitere Entwickelungen und Anwendungen seiner Theorie veröffentlichte Ohm in Schweigger's Journal LV, S. 1, 1829; LVIII, S. 393, 1830 u. s. f.

[2]) Jahresbericht über die Fortschr. d. Physik und Chemie VII, S. 15, 1828.

[3]) Maassbestimmungen über die galvanische Kette, Leipzig 1831. Repertorium der Physik I, S. 392 bis 449, 1832.

[4]) Pogg. Ann. XLVII, S. 123 bis 131, 1839.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

keit zur gründlichen Einsicht in die Wirkungsweise der elektrischen Ströme zu finden verdient, ja bei den Physikern in Frankreich und England so gut wie völlig unbekannt ist (daher denn auch dort eine grosse Anzahl von Versuchen gemacht werden, die ganz unnütz sind, entweder weil man deren Resultate vorhersehen konnte, oder weil sich, wegen vernachlässigter Bestimmungen der nothwendigen Data, keine reine Resultate aus denselben ableiten lassen), so wird es nicht überflüssig geworden sein, an einem speciellen und leicht fasslichen Beispiele ihren Nutzen gezeigt zu haben".

Währenddem hatte nun freilich Pouillet [1]), der sich schon lange mit der Messung der Leitungsfähigkeit von Metallen beschäftigt hatte, auch in Frankreich mit der von ihm construirten Tangentenboussole dasselbe Gesetz wie Ohm für den galvanischen Strom aufgestellt und bestätigt; leider ohne Ohm dabei zu nennen [2]). Man hat auf Grund dieser Arbeit sogar Pouillet die Priorität der Entdeckung des Stromgesetzes zuertheilen wollen. Indessen hat Pouillet seine erste auf das Gesetz bezügliche Mittheilung der Pariser Akademie erst im October 1831 gemacht. Er selbst gesteht auch zu [3]), dass er Ohm's Schrift über die galvanische Kette schon vorher, in einem Auszuge [4]) wenigstens, gelesen und dass Ohm unwiderleglich vor ihm, im Jahre 1827, den Gedanken ausgesprochen habe, dass man beim Messen der Stromstärke auf den Widerstand der Kette, wie auf den übrigen Widerstand des Stromes Rücksicht nehmen müsse. Und wenn Pouillet dann weiter behauptet, dass Ohm die verschiedenen Widerstände nicht gesondert, dass Ohm nur eine mathematische, keine experimentelle Demonstration des Gesetzes gegeben und dass er (Pouillet) das Verhältniss der Intensitäten in Theilleitungen zuerst nach dem Verhältniss der Leitungsfähigkeiten behauptet habe, so lässt sich das nur durch die Annahme erklären, dass er Ohm's Arbeiten durch jenen Auszug doch nicht genau genug kennen gelernt hat [5]). Für Ohm hatte

---

[1]) Claude Servais Mathias Pouillet (16. Februar 1790 Cusance, Départ. Doubs — 14. Juni 1868 Epinay s. Seine) wurde 1819 als Stellvertreter von Biot Lehrer der Physik an der Faculté des Sciences, bald darauf auch Professor der angewandten Physik am Conservatorium des Arts-et-Métiers, 1831 auch Director dieser Anstalt. Pouillet war bis zur Februarrevolution Kammermitglied, auch längere Zeit Mitglied des königl. Unterrichtsrathes. 1849 legte er seine Stelle nieder und lebte meist auf seinem Landhause in Epinay.

[2]) Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Academie des sciences, 1837, IV, p. 267. Pogg. Ann. XLII, S. 281, 1837. In dieser Arbeit beschreibt Pouillet ausser der Tangenten- auch die Sinusboussole. Poggendorff verbesserte 1840 beide Apparate (Pogg. Ann. L, S. 504, 1840, und LVII, S. 86, 1842). Die erste Idee zu denselben soll De la Rive schon 1824 gegeben haben (Albrecht, Geschichte der Elektricität, S. 214).

[3]) Pouillet, Réponse à la lettre de Mr. Péclet, Compt. rend. XX, p. 199, 1845.

[4]) Im Bulletin des sciences von Férussac.

[5]) Vergl. Fortschritte der Physik im Jahre 1845. Dargestellt von der physikalischen Gesellschaft in Berlin. S. 443 u. f.

Elektromagnetismus, c. 1820 bis c. 1830.

Pouillet's Arbeit nachträglich den Vortheil, dass man sein Gesetz nun auch in Frankreich beachtete. In England machte Ch. Wheatstone[1]) im Jahre 1843 darauf aufmerksam, dass die klaren Begriffe von Kräften und Widerständen, welche Ohm gegeben, den vagen Begriffen von Quantität und Intensität (welche so lange geherrscht) endlich substituirt werden müssten. Die Royal Society aber hatte schon in ihrer Sitzung vom 30. November 1841 dem Entdecker Ohm die Copley-Medaille als Anerkennung seiner Verdienste zugesprochen.

Aus Pouillet's Arbeit von 1837 müssen wir noch seiner Bestimmung der Leitungsfähigkeit von Flüssigkeiten, vor Allem aber seiner Annahme einer Stromeinheit und deren Zurückführung auf chemisches Maass gedenken. Pouillet schlug als Einheit den Strom vor, welchen ein thermo-elektrisches Element aus Kupfer und Wismuth liefert, das so geschlossen ist, dass der Gesammtwiderstand gleich dem eines 20 m langen und 1 mm dicken Kupferdrahtes ist und dessen Löthstellen die eine auf 100°, die andere auf 0° C. erhalten werden. Um in jeder Minute 1 g Wasser zu zersetzen, würde dann ein Strom von 13787 Pouillet'schen Einheiten nöthig sein.

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

Bis zu Ende des vorigen Zeitraumes war das Gebiet der **Wärmelehre** ganz in den Händen des Experimentalphysikers geblieben. Die Speculationen über das Wesen der Wärme waren mit der Constatirung eines imponderablen Wärmestoffes verstummt. Der Mathematiker aber wusste mit dieser unwägbaren und darum unfassbaren Materie auch nichts anzufangen. Am ersten schienen noch die Bewegungserscheinungen der Wärme, ihre Verbreitung und Ansammlung in den Körpern der Mathematik zugänglich. In der That hatte auch schon Lambert in seiner Pyrometrie dahin bezügliche Formeln aufgestellt, und Biot, der sich bemühte, alle Theile der Physik, wenn auch nicht mathematisch deductiv zu behandeln, so doch mathematischen Messungen und mathematischen Gesetzen zu unterwerfen, hatte 1804[2]) sich genauer und erfolgreicher mit der Verbreitung der Wärme beschäftigt. Eine vollständige Eroberung des neuen Terrains für die Mathematik gelang erst Fourier[3]), der seine schon viel früher begonnenen Abhandlungen im Jahre 1822 zu einem Hauptwerke zusammenfasste und ver-

---

[1]) An account of several new instruments and processes for determining the constants of a Volta Circuit. Phil. Transactions 1843. In dieser Abhandlung beschreibt Wheatstone den von ihm erfundenen und benannten Rheostat. Pogg. Ann. LXII, S. 499, 1844.

[2]) Mém. s. la propagation de la chaleur, Journal d. Mines XVIII, Paris 1804. Sur la loi math. de la chaleur, Bull. de la Soc. philomath. 1804.

[3]) Jean Baptiste Joseph Fourier, geboren am 21. März 1768 in Auxerre, wurde auf Veranlassung des Bischofs von Auxerre in einer Militairschule erzogen, die unter Leitung von Benedictinern stand. Seinen Vater, der ein einfacher Schneidermeister gewesen, hatte er schon im Alter von acht Jahren

vollständigte [1]). Fourier griff mit seiner Arbeit da an, wo die Experimentalphysiker die Sache in grösster Verwirrung gelassen hatten, beim Begriffe der Leitungsfähigkeit der Wärme. Fourier's klare Anschauungen und festen Begriffe, die durch die mathematische Benutzung bedingte scharfe Trennung und bestimmte Charakterisirung der wirkenden Factoren gab auch dem Experimentalphysiker mit grösserer Klarheit bestimmtere Anhalts- und Zielpunkte für weiter fortschreitende Beobachtungen. Fourier's Werk ist deshalb nicht bloss für die Mathematik, der es ein neues Arbeitsfeld öffnete [2]),

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

verloren. Da man Fourier das Examen für die Artillerie, weil er nicht adelig war, nicht ablegen liess, wollte er Benedictiner werden, wurde aber durch den Ausbruch der Revolution, der er sich mit Enthusiasmus zuwandte, von jenem Entschlusse zurückgebracht. Fourier gehörte zu den 1500 Schülern, die zur école normale zugelassen wurden, 1796 wurde er selbst Lehrer an der Kriegsschule und dann an der polytechnischen Schule. Bonaparte nahm ihn mit sich nach Aegypten, wo er Mitglied und dann Secretär des Institutes von Aegypten war; er verliess Aegypten erst mit den letzten Trümmern der Armee. Danach wurde er Präfect des Isère-Departements, was er bis 1815 blieb. Trotzdem er sich geweigert hatte, auf Carnot's Befehl die Bourbonen gefangen zu nehmen, war er doch nach der Rückkehr der Letzteren einige Zeit mittellos in Paris, bis er durch einen früheren Schüler eine Stelle am statistischen Bureau erhielt. 1816 wurde er zum Mitgliede des Institutes von Frankreich gewählt, aber erst 1817 bestätigt; nach Delambre's Tode wurde er Secretär des Institutes, nach dem Tode von Laplace Präsident der polytechnischen Schule. Er starb am 16. Mai 1830 in Paris.

[1]) Théorie analytique de la chaleur, Paris 1822; deutsch von B. Weinstein, Berlin 1884. Die ersten Arbeiten Fourier's über die Verbreitung der Wärme zwischen getrennten Körpern stammen aus dem Anfange des Jahrhunderts. Ueber die Verbreitung der Wärme im Inneren der Körper sandte Fourier im Jahre 1807 an das Institut von Frankreich eine Abhandlung, von der ein Auszug 1808 im Bull. de la Soc. philomath. erschien. Eine zweite erweiterte Abhandlung über dasselbe Thema wurde am 28. September 1811 im Archive des Institutes niedergelegt, im Jahre 1812 preisgekrönt, aber erst 1824 in den Memoiren der Akademie gedruckt. „Die berühmten Preisrichter Laplace, Lagrange, Legendre... erklärten..., dass die wahren Differentialgleichungen für die Fortpflanzung der Wärme endlich aufgefunden seien: aber sie sprachen aus, dass man in der Art, wie der Verfasser zu ihnen gelange, auf Schwierigkeiten stosse. Sie fügten weiter hinzu, dass auch die Integrationsmethoden etwas zu wünschen übrig liessen, selbst vom Gesichtspunkte der Strenge aus betrachtet, ohne übrigens ihre Ansicht durch eine weitere Ausführung in irgend einer Art zu unterstützen. Fourier ist mit dieser Beurtheilung nie einverstanden gewesen.“ (Arago, sämmtl. Werke I, S. 273.)

[2]) „Dieselben Theorien, die uns die Integrale der Differentialgleichungen für die Wärmebewegung kennen lehren, lassen sich auf Fragen der Analysis überhaupt und auf Probleme der Dynamik anwenden, deren Lösung man lange vergeblich gesucht hat. Das tiefgehende Studium der Natur bietet eine ergiebige Quelle für mathematische Entdeckungen.“ (Fourier, analyt. Theorie d. Wärme, Berlin 1884, S. XIII.)

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

sondern ebenso für die Physik, die es an einer gefährlichen Stelle methodisch richtig ergänzte, von fundamentaler Wichtigkeit geworden.

Fourier's mathematische Entwickelungen sind rein analytisch gehalten und für die Analysis durch die Entwickelung der Functionen in periodische Reihen von hervorragender Bedeutung geworden. Fourier wollte die Theorie der Wärme, unter der er vor Allem die Theorie der Wärmeverbreitung im Inneren der Körper versteht, ebenso mathematisch bearbeiten als Lagrange dies für die Mechanik geleistet[1]).

Das Problem der Wärmefortpflanzung besteht in der Bestimmung der Temperatur eines jeden Punktes eines Körpers zu einer beliebigen Zeit, wenn die Temperaturen sämmtlicher Punkte des Körpers zu einer bestimmten, der Anfangszeit, gegeben sind. Der Wärmezustand eines Körpers ist aber nicht bloss durch das Bestreben der Wärme, sich in dem Körper gleichmässig auszubreiten, sondern auch durch das Ausstrahlen derselben durch die Oberfläche des Körpers in den umgebenden Raum bestimmt. „Es hängt aber", sagt Fourier, „die Wirkung der Fortpflanzung der Wärme für jede feste Substanz von drei Grundursachen ab: 1) von der Wärmecapacität, 2) von dem inneren Leitungsvermögen und 3) von dem äusseren Leitungsvermögen. Diese drei elementaren Eigenschaften erscheinen in den Formeln als für jeden Körper constante Zahlen. Sind sie bestimmt, so hängen alle auf die Wärmebewegung bezüglichen Fragen nur noch von analytischen und numerischen Berechnungen ab."

Das Hauptprincip der Wärmefortpflanzung lässt sich so aussprechen: „Wenn zwei Molecüle eines Körpers einander unendlich nahe liegen und verschiedene Temperaturen besitzen, so theilt das wärmere Molecül dem kälteren während eines Momentes eine bestimmte Menge[2]) von seiner Wärme mit, und diese zu einer bestimmten Zeit in einem bestimmten Momente von dem wärmeren Molecüle an das kältere über-

---

[1]) „Die Principien dieser Theorie habe ich nach dem Muster der rationellen Mechanik aus einer sehr geringen Anzahl fundamentaler Thatsachen abgeleitet, bei denen die Mathematiker nicht nach dem Grunde fragen, weil sie sie als Resultate der gewöhnlichsten Beobachtungen betrachten, die bei jedem diesbezüglichen Experimente sich immer in derselben Weise geltend machen." (Fourier, analyt. Theorie etc., S. XII.) „Ich glaube, dass die in diesem Werke auseinandergesetzten neuen Theorien für immer mit den mathematischen Wissenschaften verbunden und wie diese auf festen unveränderlichen Grundlagen aufgebaut sind. Sie werden stets dieselben Grundlagen behalten und fortdauernd an Ausdehnung zunehmen." (S. XVII.)

[2]) Als Wärmeeinheit nimmt Fourier diejenige Wärmemenge, „welche man 1 kg Eis zuführen muss, um es in 1 kg Wasser ebenfalls von der Temperatur $0^0$ zu verwandeln". Im Princip lag diese Wärmeeinheit schon den Berechnungen der specifischen Wärme von Lavoisier und Laplace zu Grunde; auch Biot gebraucht diese Wärmeeinheit in seinem „Lehrbuche der Experimentalphysik".

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

gehende Wärmemenge ist, wenn die Temperaturdifferenz derselben einen nur geringen Werth hat, dieser Temperaturdifferenz proportional". „Die unmittelbare Wärmemittheilung geht nach allen Richtungen vor sich, sie geschieht aber bei den nicht diathermanen Körpern nur zwischen unendlich benachbarten Molecülen." Die äussere Leitungsfähigkeit wird durch die Wärmemenge bestimmt, welche bei stationärem Ausströmen aus einer Flächeneinheit von der Temperatur 1⁰ in Luft von der Temperatur 0⁰ in einer Minute ausströmt. „Die von vielen Physikern und auch von mir angestellten Beobachtungen lehren, dass die Intensität der aus einem Punkte der Oberfläche nach allen Richtungen emittirten Strahlen von dem Winkel abhängt, den ihre Richtung mit der Oberfläche an der betreffenden Stelle bildet. Ich habe bewiesen, dass die Intensität des Strahles um so geringer ausfällt, einen je kleineren Winkel er mit dem die Ausstrahlungsstelle umgebenden Oberflächen-Element einschliesst und dass sie dem Sinus dieses Winkels proportional ist." Die innere Leitungsfähigkeit wird durch diejenige Wärmemenge gemessen, „die in einer überall gleich dicken, ebenen, unendlich ausgedehnten, aus einer homogenen Substanz bestehenden Platte von der Dicke der Längeneinheit im stationären Zustande durch eine den Grenzebenen parallele Flächeneinheit in der Zeiteinheit hindurchgeht, wenn die eine Grenzebene constant auf der Temperatur des unter normalen Verhältnissen kochenden Wassers, die andere constant auf der des unter normalen Verhältnissen schmelzenden Eises erhalten wird".

Die letztere Bestimmung ist die wichtigste, denn sie ist die Grundlage für die Untersuchungen über Verbreitung der Wärme im Inneren eines Körpers, „die recht eigentlich die Wärmetheorie ausmachen[1]"; sie war aber auch diejenige, welche nach den damaligen Vorstellungen am schwierigsten und am wenigsten vorbereitet war. Fourier kommt zu derselben durch Anschauung der Wärme als eines Stromes. „Wenn man nun die Differentialgleichungen für die mit der Zeit veränderlichen Wärmebewegungen eruiren will, so muss man den Ausdruck für die Wärmemenge kennen, die durch ein unendlich kleines Stück des Körpers in einer bestimmten Zeit hindurchgeht. Diese Wärmemenge ist aber nicht bloss der Temperaturdifferenz der Endfläche des Stückes proportional. . . . Wenn zwei Elemente desselben Prismas ungleicher Länge sind, aber bei dem einen der Unterschied zwischen den Temperaturen der beiden Endquerschnitte ebenso gross ist wie bei dem anderen, so stehen die in derselben Zeit sie bezüglich passirenden Wärmemengen zu einander im umgekehrten Verhältnisse der Längen der Elemente." Mit anderen Worten: Die Geschwindigkeit des Stromes hängt nicht bloss von der Temperaturabnahme, sondern auch von der Geschwindigkeit dieser Abnahme, von der Kürze der

[1]) Fourier, analyt. Theorie der Wärme, S. XV.

Wärmelehre, c 1820 bis c. 1840.

Strecken ab, auf welchen diese Temperaturabnahme statt hat; gerade so, wie die Geschwindigkeit des Flusses nicht bloss von der Höhendifferenz zweier Orte, sondern vielmehr von dem Verhältniss dieser zur horizontalen Entfernung der Orte abhängig ist[1]). Der Wärmestrom $Q$, welcher durch eine Platte von der Dicke $D$, der Fläche $F$, deren Begrenzungsflächen resp. die Temperaturen $t'$ und $t$ haben, hindurchgeht, wird also $Q = l\,\frac{F\,(t'-t)}{D}$ sein, und daraus folgt für das specifische Leitungsvermögen $l$ direct die gegebene Definition. Da nun Fourier Formeln für den Wärmestrom im Inneren und durch die Oberfläche des Körpers hatte, so war die Bestimmung des Wärmezustandes zu einer Zeit nur noch Sache der mathematischen Analyse. Er führte diese Bestimmung beispielsweise für ein unendlich langes Prisma, eine Kugel, einen Ring und einen Würfel durch. Die Anwendungen der Theorie betreffen vor Allem die Vertheilung der Wärme auf und in der Erde und in unserem Sonnensystem.

Fourier nahm das innere Leitungsvermögen als eine für jede Substanz constante Zahl an. Forbes[2]) aber zeigte später, dass von $0^0$ bis $100^0$ beim Eisen die Leitungsfähigkeit um 15,9 Proc. und beim Kupfer um 24,5 Proc. abnimmt, auch Ångström hat dann für das Kupfer eine Abnahme der Leitungsfähigkeit mit dem Wachsen der Temperatur constatirt. Forbes war zu der Idee der Abnahme der Leitungsfähigkeit durch die Vergleichung des elektrischen mit dem Wärmeleitungsvermögen gekommen, für die er bei allen Metallen ein gleiches Verhältniss annahm[3]). Versuche von G. Wiedemann und Franz[4]) waren dieser Annahme günstig. Experimente von Fr. Weber[5]) schienen dann für die Veränderlichkeit des Verhältnisses beider Leitungsvermögen mit der specifischen Wärme der Metalle zu sprechen. Weitere Versuche[6]) aber machten doch wahrscheinlich, dass für dieselbe Temperatur das Verhältniss der Leitungsfähigkeiten für alle Metalle constant ist und dass nur die Lei-

---

[1]) Ohm's ganz ähnliche Betrachtungen über den elektrischen Strom haben wir schon S. 212 erwähnt. Es kann nicht zweifelhaft sein, dass Ohm durch Fourier auf jenem Wege geleitet wurde und dass somit Fourier's mathematische Theorie der Wärme auch der mittelbare Anlass zur Ausbildung der mathematischen Theorie des galvanischen Stromes geworden ist.

[2]) James David Forbes (20. April 1809 Edinburgh — 31. December 1868 Clifton), Professor der Physik an der Universität Edinburgh, später hauptsächlich mit Gletscherstudien beschäftigt.

[3]) Forbes, Proceedings of the Roy. Soc. of Edinb. I, 1832. Ångström, Pogg. Ann. CXIV, S. 513, und CXVIII, S. 423.

[4]) Pogg. Ann. LXXXIX, S. 497, 1853.

[5]) Wiedemann's Annalen XIII, S. 417.

[6]) Kirchhoff und Hansemann, Wied. Ann. XIII, S. 406, 1881. Lorenz, ibid. XIII, S. 422, 582.

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

tungsfähigkeit für Elektricität mit dem Anwachsen der Temperatur schneller abnimmt als die für Wärme, so dass man setzen kann:

$$\frac{\text{Leitungsfähigkeit für Wärme}}{\text{Leitungsfähigkeit für Elektricität}} = \text{Constante} \times \text{Temperatur}\ ^{1)}.$$

Die Abgabe der Wärme eines Körpers nach aussen geschieht, wie Fourier bemerkt, durch directe Ausstrahlung derselben in den Raum und durch unmittelbare Abgabe derselben an die den Körper umgebenden Medien. Die verschiedene Art der Abhängigkeit beider Factoren von äusseren Umständen musste untersucht werden, ehe man zu einem Entscheide über das Gesetz des Erkaltens der Körper, über welches die Meinungen so stark auseinander gingen, gelangen konnte. Die zahlreichsten und sorgfältigsten Versuche dazu lieferten Dulong und Petit um das Jahr 1818 [2]. Ein Thermometer, das selbst als heisser Versuchskörper diente, wurde in die Mitte einer, drei Decimeter im Durchmesser haltenden, innen berussten Kupferkugel eingesenkt. An die Oeffnung der Kupferkugel war durch eine genau aufgeschliffene Glasplatte eine Glasröhre befestigt, welche die Skala des Thermometers umschloss. Diese Glasröhre konnte durch eine Bleiröhre mit dem Recipienten einer Luftpumpe und dann auch mit einem Gasometer verbunden werden, so dass man die Kugel beliebig luftleer machen oder auch mit comprimirter Luft oder beliebigen Gasen füllen konnte. Durch einen Trog mit Wasser, der die Kupferkugel umgab, erhielt man dieselbe auf immer gleicher Temperatur. Das Thermometer wurde bei den Versuchen bis nahe zum Siedepunkte des Quecksilbers erwärmt, rasch in die Kupferkugel eingesenkt und die Abkühlungszeit dann beobachtet. Die Abkühlung im luftleeren Raume (die Abkühlung durch blosse Strahlung) erwies sich danach nicht bloss von dem Unterschiede der Temperatur des abzukühlenden Körpers und seiner Umgebung abhängig, sondern auch von der absoluten Temperatur der letzteren selbst und wuchs mit dieser. Abgesehen aber von Veränderungen der äusseren Temperatur, zeigte sich für die Abkühlung das Newton'sche Erkaltungsgesetz auch nur für kleine Temperaturdifferenzen gültig. Meist war die Abkühlung grösser als sie nach diesem Gesetze hätte sein dürfen, vielleicht aber nur, weil auch die umgebende Hülle Wärme ausstrahlte, welche ersetzt werden musste. Die Einrichtung der Apparate erlaubte nur die Erkältung zweier verschiedener Substanzen zu beobachten, nämlich des Glases und des Silbers, wenn die Thermometerkugel mit einer

---

[1] Vergl. Wiedemann, Die Lehre von der Elektricität I, S. 532 bis 536.

[2] Recherches sur la mesure de températures et sur les lois de la communication de la chaleur. Ann. de chim. et de phys. VII, p. 113, 225, 337; 1818. Von der Pariser Akademie gekrönt. Schweigger's Journal XXV, S. 304, 1819.

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

Silberschicht überzogen war. Da diese Substanzen an Ausstrahlungsvermögen sehr verschieden sind und für sie die Gesetze in gleicher Weise sich gültig zeigten, so meinten Dulong und Petit dies für alle Substanzen annehmen zu dürfen.

Um die Abkühlung durch unmittelbare Ableitung an die Umgebung zu finden, füllten Dulong und Petit ihren Ballon mit den verschiedensten Gasarten unter den verschiedensten Temperaturen und Drucken, bestimmten hierfür die Abkühlungszeiten und zogen dann die vorher festgestellten Abkühlungszeiten im Vacuum ab. Dadurch erhielten sie das folgende Gesetz: Der Verlust an Wärme, welcher durch die Berührung irgend einer Gasart bewirkt wird, ist unter übrigens gleichen Umständen von der Beschaffenheit der Oberfläche des erkaltenden Körpers unabhängig, hängt aber ab von der Dichtigkeit und Temperatur des Gases und zwar so, dass die Geschwindigkeit des Erkaltens dieselbe bleibt, wenn die Dichtigkeit und Temperatur des Gases sich derartig ändern, dass die Elasticität des letzteren einen constanten Werth behält. Spätere Arbeiten, wie die von De la Provostaye und Desains[1]) und Wilhelmy[2]), bestätigten im Wesentlichen dieses Resultat.

Die Wärmeabgabe eines Körpers nach aussen hängt vor Allem auch von seiner Wärmecapacität ab. Nachdem Dulong und Petit die Gesetze des Erkaltens festgestellt, kamen sie nothwendig dazu, aus diesen Erscheinungen die specifischen Wärmen der einzelnen Substanzen zu bestimmen. Joh. Tob. Mayer[3]) hatte behauptet, dass die specifische Wärme eines Körpers aus der Zeit seiner Abkühlung zu entnehmen sei; und Leslie[4]) hatte auch nach der Erkaltungsmethode schon die specifische Wärme verschiedener Stoffe bestimmt. Doch machte man diesen Versuchen zum Vorwurf, dass bei ihnen Nebenumstände, wie verschiedenes Strahlungs- und Leitungsvermögen etc., die Genauigkeit der Messungen bedeutend gefährdet hätten. Die Wirkung solcher Nebenumstände vermieden Dulong und Petit, indem sie für die Beobachtung der Erkaltung wieder den vorher angegebenen Apparat gebrauchten[5]). Damit die Strahlung immer dieselbe sei, schlossen sie den zu untersuchenden Körper mit dem Thermometer immer in dasselbe dünnwandige Gefäss ein und hingen dies in die Kupferkugel, wie vorher das Thermometer. Zur Elimination der Leitung wurde die Kugel bis auf 2 mm Quecksilberdruck leer gepumpt, die Temperatur derselben immer auf $0^0$ erhalten und die Abkühlungszeit des Körpers, während die Temperatur von $10^0$

---

[1]) Ann. de chim. et de phys. (3) XVI, p. 337, 1846; Pogg. Ann. LXVIII, S. 235, und LXIX, S. 367.

[2]) Versuch einer math.-physik. Wärmetheorie, Heidelberg 1851.

[3]) Ueber die Gesetze und Modificationen des Wärmestoffes, Erlangen 1796.

[4]) Experimental inquiry into the nat. a. properties of heat, London 1804.

[5]) Rech. s. quelques points importants de la théorie de la chaleur, Ann. de chim. et de phys. X, p. 396, 1819. Schweigger's Journal XXVIII, S. 121, 1820.

bis auf 5⁰ oder 0⁰ sank, beobachtet. Ihre Bestimmungen der specifischen Wärme fester Körper zeigten sich denn auch wohl brauchbar und führten direct zu dem nach Dulong und Petit benannten merkwürdigen Gesetze, dass das Product der specifischen Wärmecapacitäten in die Atomgewichte eine constante Grösse ist. Das Gesetz wurde auch auf flüssige Körper und luftförmige ausgedehnt, aber in der ersten Zeit fast mehr widerlegt als bestätigt. Selbst Berzelius, der die grosse Wichtigkeit des Gesetzes für die Bestimmung der Atomgewichte nicht verkannte, liess doch zuerst die Frage über die Allgemeinheit desselben noch unentschieden [1]). Fr. E. Neumann [2]) aber, sowie Regnault [3]) u. A. bestätigten nicht nur das Gesetz, sondern dehnten dasselbe auch auf die festen chemischen Verbindungen aus; wobei freilich selbst unter den Elementen noch immer einige unerklärliche Ausnahmen blieben [4]).

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

Einer der Ersten, welcher sich für das Dulong-Petit'sche Gesetz aussprach, war auch Avogadro, der dasselbe als einen Beweis für die von ihm gegebene Hypothese über die Grösse der Körpermolecüle ansah. Avogadro hatte nämlich schon um das Jahr 1811 [5]) sein berühmtes Gesetz aufgestellt, nach dem in gleichen Volumen verschiedener Gase unter sonst gleichen Umständen gleichviel Molecüle enthalten sind, oder was dasselbe sagt, nach dem sich die specifischen Gewichte von Gasen ganz wie die Gewichte ihrer Molecüle verhalten. Merkwürdig ist es, dass Avogadro's Entdeckung von den Chemikern und Physikern bis dahin gänzlich unbeachtet gelassen worden war. H. Kopp [6]) hält dies für einigermaassen darin begründet, „dass zu jener Zeit, wo eben erst die Chemiker angefangen hatten, sich mit der Zurückführung der Zusammensetzungsverhältnisse der Verbindungen auf die relativen Gewichte der kleinsten Theilchen der Bestandtheile zu beschäftigen, die Unterscheidung von zweierlei Arten solcher Theilchen — physikalisch

---

[1]) Kopp, Entwickelung der Chemie, München 1883, S. 396.

[2]) Pogg. Ann. XXIII, S. 1, 1831.

[3]) Ann. de chim. et de phys. (2) LXXIII, p. 5, 1840; Pogg. Ann. LI, S. 44, 213, 1840. Ann. de chim. et de phys. (3) I, p. 129, 1841; Pogg. Ann. LIII, S. 60, 243, 1841.

[4]) Alexis Thérèse Petit (2. October 1791 Vesoul — 21. Juni 1820 Paris), Professor der Physik an der polytechnischen Schule in Paris.

Pierre Louis Dulong (12. Februar 1785 Rouen — 19. Juli 1838 Paris), seit 1820 Professor der Physik an der polytechnischen Schule in Paris, zuletzt Studiendirector derselben. Dulong war zuerst Arzt, weil er aber die Armen nicht bloss umsonst behandelte, sondern auch die Arzneien für sie bezahlte, so wurde ihm der Beruf zu kostspielig. Doch auch als Physiker absorbirten die Kosten seiner theuren Apparate sein Vermögen. Arago rühmte an Dulong's Grabe seinen Scharfsinn, seine Gründlichkeit, Geduld, Genauigkeit und Vorsicht in den Folgerungen aus den Versuchen.

[5]) Versuch eines Verfahrens, die relativen Gewichte der Elementarmolecüle der Körper und die Verhältnisse zu bestimmen, nach welchen dieselben in Verbindung treten; Journ. de phys. LXXIII, 1811.

[6]) Entwickelung der Chemie, S. 353.

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

kleinster und chemisch kleinerer, wie später deutlicher als damals unterschieden wurde — diese Lehre eher zu compliciren als verständlicher zu machen schien". Auch Ampère vermochte im Jahre 1814[1]) noch nicht mit der Unterscheidung von Molecülen und Atomen, und selbst 1835[2]) noch nicht mit der dreifachen Theilung der Materie in Partikeln, denen noch der Aggregatzustand des Körpers zukommt, in physikalisch kleinste Theilchen, Molecüle, und in chemisch kleinste Theilchen, Atome, durchzudringen.

Die Bestimmung der specifischen Wärmen, wie sie Dulong und Petit mit so grossem Erfolge bei festen Körpern und Flüssigkeiten durchgeführt, war nicht in derselben Weise mit gleichem Vortheil für Gase auszuführen, schon darum nicht, weil bei den verhältnissmässig kleinen Massen der Gase, die das Gefäss des Calorimeters zu fassen vermag, die Wände dieses Gefässes stets einen zu grossen Einfluss ausüben müssen. Lavoisier und Laplace liessen schon bestimmte grössere Volumina der auf ihre specifische Wärme zu untersuchenden Gase durch ihre Eiscalorimeter hindurchströmen und beobachteten die Temperatur des einströmenden und ausströmenden Gases, sowie die Menge des geschmolzenen Eises. Doch erhielten sie wenig zuverlässige Resultate. Erst Delaroche und Bérard vermochten durch eine ähnliche, aber verbesserte Methode genügende Erfolge zu erzielen. Ihre Arbeit, für welche sie den Preis der Pariser Akademie erhielten, erschien unter dem Titel: Sur la détermination de la châleur spécifique des différens gas in dem LXXXV. Bande, p. 72, der Annales de chimie et de physique des Jahres 1813[3]).

Das aus einem Mariotte'schen Gefässe ausfliessende Wasser trieb gleichmässig die Luft aus einem Behälter in einen geschlossenen Glasballon und drückte eine in diesem enthaltene thierische Blase zusammen. Aus dieser Blase floss die zu untersuchende Gasart in eine Röhre, die zuerst durch ein weites Rohr ging, in welche die Gasart durch Dämpfe auf 100° erhitzt wurde, und danach sich in acht Schlangenwindungen durch ein Wassercalorimeter wand. Aus der Temperaturerhöhung dieses Wassers und der Abkühlung der Gasart im Schlangenrohre, wurde die specifische Wärme der gemessenen Menge Gas bestimmt. Auf solche Weise erhielten Delaroche und Bérard für die specifischen Wärmen gleicher Gewichte der Gasarten folgende Zahlen:

---

1) Ann. de chim. et de phys. (1) XC, 1814.

2) Ibid. (2) LVIII, 1835.

3) Jacques Étienne Bérard (1789—1869), seit 1817 Professor der Chemie in Montpellier, früher Präparator bei Berthollet in Paris.

| | | |
|---|---|---|
| Atmosphärische Luft . . | 1,0000 | 0,2669 |
| Wasserstoff . . . . . | 12,3401 | 3,2936 |
| Kohlensäure . . . . . | 0,8280 | 0,2210 |
| Sauerstoff . . . . . | 0,8848 | 0,2361 |
| Stickstoff . . . . . | 1,0318 | 0,2754 |
| Stickstoffoxydul . . . | 0,8875 | 0,2369 |
| Oelbildendes Gas . . . | 1,5763 | 0,4207 |
| Kohlenoxyd . . . . . | 1,0805 | 0,2884 |
| Wasserdampf . . . . | 3,1360 | 0,8470 |
| | | 1,0000 Wasser. |

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

Für gleiche Volumina der Gase umgerechnet, ergeben diese Zahlen bei Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff nahezu die gleichen Werthe, bei den anderen Gasen aber beträchtliche Abweichungen. Haycraft wollte diese Abweichungen durch Ungenauigkeiten in den Versuchen von Delaroche und Bérard erklären und behauptete[1], was Gay-Lussac schon für wahrscheinlich gehalten, dass alle einfachen oder zusammengesetzten Gase bei gleichem Volumen eine gleiche Wärmecapacität besässen. Ihm schlossen sich Marcet und de la Rive an, die aus ihren zahlreichen Versuchen ebenfalls jenes Gesetz ableiteten. Die letzteren Physiker gebrauchten zuerst Apparate, die im Wesentlichen mit denen identisch waren, welche Dulong und Petit zur Messung der specifischen Wärme fester Körper benutzt hatten, sie schlossen also in ihren Calorimetern bestimmte Volumina der zu untersuchenden Gase ab[2]. Später, als ihre Resultate mehrfach angegriffen wurden, führten sie auch Ströme von Gasen durch ihre Calorimeter hindurch[3]. Einen gewissen Abschluss erhielten diese Untersuchungen durch V. Regnault[4], der von 1840 an nach der Methode von Delaroche und Bérard, nur mit feineren Apparaten und unter Beobachtung aller möglichen Vorsichtsmaassregeln seine Messungen anstellte. Die von ihm erhaltenen Werthe der specifischen Wärmen der Gase giebt man heute als die sichersten und genauesten Zahlen in den Lehrbüchern der Physik an. Diese Zahlen aber stimmen am besten mit den Werthen von Delaroche und Bérard und bestätigen das obige Gesetz wieder nur für die drei Gase Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff, welche am meisten sich der Beschaffenheit eines idealen Gases nähern.

Alle diese Versuche bezogen sich natürlich nur auf die specifische Wärme der Gase bei constantem Drucke und ungehinderter Ausdehnung. Die directe Bestimmung der specifischen Wärme bei constantem Volumen wollte damals wie auch heute noch

---

[1]) Edinb. Phil. Trans. X, p. 195; Gilbert's Annalen LXXVI, S. 289, 1824.

[2]) Ann. de chim. et de phys. XXXIII, p. 209. Ibid. XXXV, p. 5, 1827. Pogg. Ann. X, S. 363, 1827; ibid. XVI, S. 340, 1829.

[3]) Bibl. univ. XXVIII, p. 360, 1840; Pogg. Ann. LII, S. 120, 1841.

[4]) Mém. de l'Acad. des sc. d. l'Inst. de France XXVI, p. 58.

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

nicht gelingen. Dass die erstere einen grösseren Werth haben müsse, weil dieselbe nicht bloss zur Erzeugung der Temperatur, sondern auch zur Ausdehnung des Gases verbraucht wird, wusste man trotzdem [1]). E. Darwin hatte 1788 die Abkühlung der Luft beim Ausströmen aus dem Kolben der Windbüchse gegen ein Thermometer und danach auch beim Einströmen derselben in den Recipienten der Luftpumpe bemerkt und hatte aus der Verdünnung der Luft die Kälte auf hohen Bergen erklärt [2]). Pictet glaubte auch 1798 bemerkt zu haben, dass an einer Röhre, aus welcher stark comprimirte Luft entweicht, Wassertropfen zu Eis gefrieren [3]). Doch wollten andere Physiker jene Erscheinungen entweder als scheinbare, verursacht durch die ungleiche Ausdehnung des Glases und des Quecksilbers, oder als Folgen des Verdampfens des in der Luft enthaltenen Wassers erklären. Erst Dalton [4]) scheint den Zusammenhang zwischen den Volumenveränderungen der Gase und dem Verbrauche von Wärme klar gelegt und nachgewiesen zu haben. Wie neu die Sache selbst den Physikern damals noch war, ersieht man aus dem Aufsehen, welches die Erfindung des pneumatischen Feuerzeuges seiner Zeit hervorrief. Ein Arbeiter in der Gewehrfabrik zu Étienne en Forez soll zuerst wahrgenommen haben, dass bei der Ladung einer Windbüchse mit einer gewöhnlichen Compressionspumpe eine grosse Menge Wärme entsteht und soll dann zuerst durch diese Wärme Zündschwamm zum Brennen gebracht haben. Mollet, Professor der Physik in Lyon, theilte die Nachricht davon nach Paris mit [5]), wo man, bis bestätigende Versuche bekannt wurden, nicht abgeneigt war, die ganze Sache für unbegründet zu halten. Für besonders überzeugend erklärte man später die Beobachtung der Verdünnungskälte mit Hülfe von Metallthermometern [6]).

---

[1]) Biot machte sogar darauf aufmerksam, dass auch bei festen Körpern und Flüssigkeiten eigentlich beide Arten von specifischer Wärme zu unterscheiden wären: „Freilich ist man einem Uebelstande der nämlichen Art auch bei den Versuchen über die specifischen Wärmen der tropfbarflüssigen und festen Körper ausgesetzt, weil sie sich beim Erkalten ebenfalls zusammenziehen; da jedoch ihre Umfangsänderung weit geringer ist, so nimmt man die dadurch bedingte Wärmeentbindung auch nur für sehr schwach im Verhältniss zu der, welche von der Temperaturerniedrigung herrührt, an". (Lehrb. d. Experimentalphys. IV, S. 295.)

[2]) Erasmus Darwin (1731—1802, der Grossvater von Charles Darwin): Frigorific exper. on the mechan. expansion of air, Phil. Trans. LXXVIII, 1788; Gren's Journal I, S. 73, 1790.

[3]) Gilbert's Annalen d. Physik II, S. 243, 1799.

[4]) On the heat and cold produced by the mechan. condensat. and rarefaction of air, Mem. Manchester Soc. V, pt. II, p. 515, 1802, gelesen 1800; Gilbert's Ann. d. Physik XIV, S. 101, 1803.

[5]) Journal de physique LVIII, 1803.

[6]) Die Erfindung der Metallthermometer setzt man in den Anfang dieses Jahrhunderts und schreibt sie dem Uhrmacher Jörgensen in Kopenhagen oder dem Uhrmacher Holzmann in Wien zu. Grössere Verbreitung

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

Die Compressionswärme und die Verdünnungskälte benutzten Gay-Lussac und Welter[1]), wie auch Desormes und Clément[2]), um das Verhältniss der specifischen Wärmen der Luft mit oder ohne Ausdehnung zu bestimmen. Durch wesentlich gleiche Methoden erhielten die Ersteren für dieses Verhältniss, dessen Werth man mit dem Buchstaben $k$ bezeichnet, 1,372, die Letzteren 1,357. Indessen wurde vermuthet, dass die Wärmeverluste bei den überhaupt nur geringen auftretenden Wärmemengen zu gross geworden und jene Zahlen doch etwas zu klein seien. Dulong schlug darum zur Prüfung jener Versuche ein methodisch ganz anderes Verfahren, einen indirecten Weg zur Ermittelung jener Verhältnisszahl ein.

Nach den Band II, S. 233 dieses Werkes beschriebenen Untersuchungen Newton's über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in Gasen erhält man leicht für diese Geschwindigkeit die Formel $V = \sqrt{\frac{g h s_1}{s}}$, wo $g$ die Beschleunigung der Schwere, $h$ die Barometerhöhe, $s_1$ das specifische Gewicht des Quecksilbers und $s$ das des Gases, beide auf Wasser bezogen, bezeichnen. Wie schon erwähnt, constatirte Laplace, dass man diesen Werth $V$ mit $\sqrt{k}$ multipliciren müsse, um mit der Erfahrung übereinstimmende Resultate zu erhalten. Die Formel zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Gasen ist danach $V = \sqrt{\frac{g h k s_1}{s}}$.

Dulong[3]) kehrte nun das Problem um und berechnete umgekehrt aus den empirisch gemessenen Schallgeschwindigkeiten den Coëfficienten $k$ und danach auch die specifische Wärme bei constantem Volumen für die verschiedenen Gase. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in verschiedenen Gasen bestimmte er zu diesem Zwecke wie Chladni, nur nochmals genauer, mit Hülfe von tönenden Pfeifen. Aus diesen Beobachtungen und der Formel $k = \frac{V^2 \cdot s}{g h s_1}$ erhielt er die folgende Tabelle:

---

erhielten dieselben erst durch den Uhrmacher Abraham Louis Breguet in Paris (Breguet, 1748—1823: Nouveaux thermomètres métalliques, Ann. de chim. et de phys. V, 1817).

[1]) Gay-Lussac, Mém. de la Soc. d'Arcueil I, 1807: Prem. ess. p. déterminer les variations de temp. qu'éprouvent les gaz en changement de densité, et considération s. leur capacité p. le calorique. Gay-Lussac und Welter, Mécanique céleste V, p. 125, 1825.

[2]) Du zéro absolu de la chaleur et du calorique spécifique, Journ. de physique LXXXIX, p. 333, 1819. Charles Bernard Desormes (1777—1862), Repetent für Chemie an der polytechnischen Schule, dann Fabrikant chemischer Producte; sein Schwiegersohn Clément († 1841) war Professor der angewandten Chemie am Conserv. des Arts-et-Métiers.

[3]) Recherches sur la chaleur spécifique des fluides élastiques, Ann. de chim. et de phys. XLI, p. 113, 1829. Poggendorff's Annalen XVI, S. 438, 1829.

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

| Gasarten | Werthe von $k$ |
|---|---|
| Atmosphärische Luft . . . . . . . . | 1,421 |
| Sauerstoff . . . . . . . . . . . . . | 1,415—1,417 |
| Wasserstoff . . . . . . . . . . . | 1,405—1,409 |
| Kohlensäure . . . . . . . . . . . | 1,337—1,340 |
| Kohlenoxyd . . . . . . . . . . . . | 1,423—1,433 |
| Stickoxyd . . . . . . . . . . . . . | 1,343 |
| Oelbildendes Gas . . . . . . . . . | 1,240 |

Dulong's Resultat für atmosphärische Luft wich ziemlich bedeutend von dem früher erhaltenen Gay-Lussac'schen Werthe ab. Doch hielt er dasselbe dem letzteren gegenüber vollständig aufrecht und, wie sich später gezeigt hat, nicht mit Unrecht.

Durch die Entdeckung der Compressionswärme und der Verdünnungskälte war nicht bloss die directe Umsetzungsfähigkeit von Wärme und mechanischer Kraft, sondern auch die Wechselseitigkeit dieser Umsetzungen qualitativ vollkommen klar gestellt worden. Es schien nichts näher zu liegen als die Frage, ob nicht das quantitative Verhältniss dieser Verwandlungen ein immerwährend festes sei, ob man überall nach einer Verwandlung von mechanischer Kraft in Wärme aus dieser letzteren die erste mechanische Kraft nicht bloss der Form nach, sondern auch in ihrer ursprünglichen Grösse zurückerhalten könne, ob das Verhältniss der Umsetzungen auch der Quantität nach reciprok sei. Zu einer solchen Untersuchung drängte die immer mehr und immer vielseitiger sich entwickelnde Benutzung der thermodynamischen Maschinen; auch waren für dieselben die nöthigen metrischen Grundlagen, Einheiten für mechanische Kraft und Wärme, schon vorhanden.

Und doch nahm nur ein Einziger, und nicht einer der berühmtesten Physiker oder Techniker, der Ingenieurcapitän Sadi Carnot, die Aufgabe auf und löste dieselbe, soweit es ohne Umsturz der herrschenden Wärmetheorie möglich war. Er veröffentlichte seine Arbeit unter dem Titel: Réflexions sur la puissance motrice du feu et les machines propres à développer cette puissance (Paris 1824); das Wesentlichste aus derselben ist kurz das Folgende. Jede thermodynamische Maschine muss, da die Temperatur nicht immerwährend abnehmen kann, nach einem gewissen Zeitraume ihrer Wirkung wieder auf ihren vorigen Zustand zurückgebracht werden können, um dann ihre Wirkung von Neuem zu beginnen. Jede thermodynamische Maschine muss also fortwährend Kreisprocesse durchlaufen, sie muss kurz eine Kreismaschine sein. Um die Wirkung einer solchen zu beurtheilen, denke man sich einen Dampfcylinder mit beweglichem Kolben vollkommen

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

für Wärme undurchdringlich, so dass er nur Wärme vom Dampfkessel empfangen und nur Wärme an den Condensator abgeben kann. Wir nehmen dabei Dampfkessel wie Condensator nur als Wärme- und Kältereservoire von immer constanter Temperatur, die mit dem Dampfcylinder in keiner anderen als Wärme leitender Verbindung stehen. Denken wir uns nun den Dampfcylinder, in welchem etwas Wasser sich befindet und der Kolben bis auf das Wasser niedergedrückt und festgehalten ist, auf die Temperatur des Dampfkessels gebracht, und beginnen wir in dem Augenblicke, wo diese Temperatur erreicht ist, unseren Versuch, indem wir den Dampfcylinder mit dem Kessel in Verbindung setzen und den Kolben lösen. Jetzt wird das Wasser im Cylinder verdampfen und den Kolben heben, die dazu nöthige Wärme strömt aus dem Dampfkessel zu. Schliessen wir nach einer gewissen Zeit den Dampfcylinder gegen den Dampfkessel ab, so werden die Wasserdämpfe vermöge ihrer Elasticität den Kolben noch weiter heben, aber ihre Temperatur wird dabei sinken. Wenn das so weit geschehen, dass diese Temperatur der des Condensators gleich ist, so setzen wir den Cylinder mit jenem in Verbindung und drücken nun den Kolben um eine gewisse Strecke nieder. Dabei wird Wärme entstehen, aber diese Wärme wird vom Condensator aufgenommen. Der Kolben muss so weit niedergedrückt werden, dass, wenn wir nun die Verbindung mit dem Condensator unterbrechen und den Kolben noch weiter bis ans Ende des Cylinders herabdrücken, die nun entstehende und nicht mehr abgehende Wärme die Temperatur des Cylinders wieder auf die des Dampfkessels bringt. Während der vier Stadien des nun vollendeten Kreisprocesses hat der Dampfcylinder im ersten Stadium Wärme aus dem Dampfkessel aufgenommen und im dritten Stadium Wärme an den Condensator abgegeben; ferner hat er im ersten und zweiten Stadium durch Heben des Kolbens Arbeit geleistet und im dritten und vierten Stadium äussere Arbeit erlitten oder beim Niederdrücken des Kolbens Arbeit consumirt. Diese letztere Arbeit ist aber kleiner als die erstere, weil dieselbe Bewegung im ersteren Falle bei höherer, im letzteren bei niederer Temperatur vor sich ging. Im Ganzen ist also bei diesem Kreisprocesse Arbeit gewonnen oder erzeugt worden; dafür ist von dem Dampfkessel Wärme an den Cylinder und von diesem wieder an den Condensator abgegeben worden. Carnot hält diese Wärmemengen für absolut gleich und erklärt dies für einen Grundsatz der Wärmetheorie [1]). Dann aber kann die Arbeit nur durch den Abfluss der Wärme aus einem Körper von höherer Temperatur in einen solchen von niederer Temperatur erzeugt sein; ein Wärmestrom aus dem heisseren nach dem kälteren Körper

[1]) Réflexions etc., p. 27: „Diese Thatsache ist niemals in Zweifel gezogen worden; sie ist zuerst ohne Reflexion zugelassen und danach in vielen Fällen durch Versuche mit dem Calorimeter bestätigt worden. Sie leugnen, würde die ganze Theorie der Wärme, der sie zur Grundlage dient, umstürzen."

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

muss gerade so mechanische Kraft erzeugen, wie ein Strom fallenden Wassers [1]). Hiernach liegt es nahe, den Satz umzukehren und zu behaupten, dass jedenfalls mechanische Arbeit dazu gehört, um aus einem kälteren Körper Wärme auf einen wärmeren zu übertragen, und dass diese Wärmemenge der vorigen gleich wird, wenn die Arbeit dieselbe ist.

Für den vorigen Kreisprocess ist das unbedingt klar. Derselbe lässt sich eben so gut als vorher auch in umgekehrter Richtung wiederholt denken, wo dann gerade so viel Arbeit, als vorhin gewonnen wurde, nun aufgewendet werden muss, um dieselbe Quantität Wärme wieder vom Condensator zum Dampfkessel zurückzuschaffen.

Diese umkehrbaren Kreisprocesse aber bilden noch den günstigsten Fall für die Transformation von Wärme und Arbeit. Denn könnte man auf anderem Wege Wärme von dem kälteren auf den wärmeren Körper ohne oder mit geringerer Arbeit übertragen, so brauchte man nur, wenn durch die erste Maschine Wärme vom wärmeren auf den kalten Körper übergegangen und Arbeit gewonnen, einen Theil dieser Arbeit zu benutzen, um auf dem anderen Wege die Wärme wieder zurückzuschaffen. Man könnte also, ohne neue Wärme des warmen Körpers zu verbrauchen, immerwährend Arbeit gewinnen. Da aber ein perpetuum mobile nicht möglich ist, so ist es auch nicht möglich, mit geringerer Arbeit als in jenem umkehrbaren Kreisprocesse Wärme von dem kälteren Körper auf den wärmeren zu übertragen. Es besteht also zwischen mechanischer Arbeit und der Wärmemenge und ihrem Gefälle ein festes Verhältniss, das von allen anderen Umständen, wie den Substanzen, welche die Wärme enthalten, u. s. w. unabhängig ist.

Durch diesen Satz ist Carnot der Vater der neueren Wärmetheorie geworden, in so weit, als dieselbe mathematisch ist und nur die Grössenverhältnisse der Wirkungen betrachtet. Hier ist auch die Methode Carnot's geblieben; seine Maschine, seine Kreisprocesse gebraucht die neuere Wärmetheorie noch gerade so wie Carnot selbst [2]). Carnot war auch in sofern originell, als er zum ersten Mal klar und deutlich nicht bloss die Erschaffung mechanischer, sondern auch die physischer Kräfte überhaupt leugnete, als er nicht nur das perpetuum mobile mechanicum, sondern auch das perpetuum

---

[1]) Der Ausdruck la chute du calorique lässt deutlich erkennen, dass auch seine Vorstellungen in den Arbeiten Fourier's wurzeln.

[2]) Carnot hatte in seinem Werke, das dem Geiste nach ganz mathematisch ist, doch im Interesse der Allgemeinverständlichkeit desselben den Gebrauch mathematischer Formeln und besonderer Kunstausdrücke so viel als möglich vermieden. Eine mathematische Bearbeitung desselben, einen Umguss der Carnot'schen Sätze in analytische Formeln gab Bénoit Pierre Emile Clapeyron (1799 — 1864, Ingenieur) in der Abhandlung „Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur“ (Journ. de l'école polyt. XIV, 1834; übersetzt in Pogg. Ann. LIX, S. 446, 1843).

mobile physicum[1]), wenigstens soweit es thermodynamische Maschinen betraf, für unmöglich erklärte. Dagegen hat Carnot in seinem Werke nichts dafür gethan, die Wärmeeinheit mit der Einheit der mechanischen Kraft zu vergleichen und so die Beziehungen zwischen beiden ganz klar zu stellen. Das lag an seinen Anschauungen vom Wesen der Wärme, bei denen er damals noch ganz in den Kreis der alten Physik gebannt war. Nicht die Wärme war danach die Ursache der Arbeitsleistung, nicht die Wärme wandelte sich in mechanische Kraft um. Die Wärme blieb bei jeder Arbeitsleistung immer dieselbe, und nur ihr Gefälle ging dabei verloren und wurde in Arbeit umgesetzt. Von einem Verhältniss der Wärme- und der Arbeitsmenge konnte also gar nicht die Rede sein, und der Begriff der Transformation der Wärme und der Erhaltung der Kraft, der die neuere Physik charakterisirt, war Carnot noch völlig fremd. Darum war auch das Werk Carnot's wohl geeignet, eine Brücke zu schlagen zwischen Mechanik und Wärmelehre, liess aber jede Beziehung zwischen der letzteren und anderen physikalischen Gebieten so ungeklärt als früher.

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

Merkwürdig bleibt bei alledem die Nichtbeachtung, welche das Werk seiner Zeit erfuhr und die so vollständig als möglich war. Weder Berzelius in seinen Jahresberichten über die Fortschritte der Physik und Chemie, noch die in jener Zeit erschienenen Repertorien der Physik, noch Gehler's Wörterbuch der Physik erwähnen Carnot; erst nach der Entdeckung des mechanischen Aequivalents der Wärme wurde auch seinen Arbeiten wieder die verdiente Aufmerksamkeit[2]).

---

[1]) Welchen bedeutenden Unterschied man in dieser Beziehung machte, ersieht man aus Muncke's Worten (Gehler VII, S. 410): „Reden wir zuerst vom perpetuum mobile physicum, so unterliegt es keinem Zweifel, dass es ein solches geben könne, da der Kreislauf der Dinge in der Natur ein stets fortdauernder und ununterbrochen sich erneuernder ist.“

[2]) Siehe H. Helmholtz: „Ueber die Erhaltung der Kraft“, Berlin 1847. (Wissenschaftliche Abhandlungen I, S. 33, Leipzig 1882); Thomson, An account of Carnot's theory, Edinb. Trans. XVI, 1849.

Sadi Carnot wurde am 1. Juni 1796 als dritter Sohn des Kriegsministers der französischen Republik Lazare Nic. Marg. Carnot geboren. Im Jahre 1812 kam er auf die polytechnische Schule, 1814 wurde er Genieofficier. 1819 trat er bei Bildung des Generalstabes als Lieutenant in diesen ein, fand aber hier wie vorher, wohl seines verbannten Vaters wegen, keine Beförderung und wandte sich dem Studium der Wärmeerscheinungen zu; 1828 nahm er seinen Abschied. Mitte Juni 1832 erkrankte er am Scharlachfieber, am 24. August desselben Jahres erlag er der Cholera in wenigen Stunden. Ausser seinen Réflexions hat er nichts Wissenschaftliches veröffentlicht; sein Bruder Hypolite Carnot aber hat einer neuen Ausgabe dieses Werkes (Paris, Gauthier Villars, 1878) ausser einer Biographie auch Anfänge zu neuen Arbeiten beigefügt. Daraus geht hervor, dass Sadi Carnot später die Annahme eines Wärmestoffs verlassen, das mechanische Aequivalent der Wärme annähernd bestimmt und auch den Satz von der Erhaltung der Kraft allgemein ausgesprochen hat. Carnot sagt: „Nach einigen Vorstellungen, welche ich mir über die Theorie der Wärme gebildet habe, erfor-

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

Vermochten die Carnot'schen Untersuchungen einen Einfluss auf die Reform der Wärmetheorie ihrer Zeit nicht zu üben, so war das um so mehr mit den neuen und sehr erfolgreich wieder aufgenommenen Untersuchungen über die strahlende Wärme der Fall. Die erste Nachricht von dem Thermomultiplicator, welcher diese Erfolge ermöglichte, gab Nobili [1]) im Jahre 1830; im nächsten Jahre konnten Nobili und Melloni von Erfolgen berichten, die sie mit einem verbesserten Instrument bei der Untersuchung des Wärmespectrums der Sonne und der Durchlässigkeit verschiedener Stoffe für dunkle Wärmestrahlen erhalten [2]). „Ueber die ungleiche Erregung der Wärme im prismatischen Sonnenbilde" [3]) hatte schon Seebeck folgende Gesetze ohne Erklärung gegeben: In allen prismatischen Farbenbildern findet Wärmeerregung statt, die von der äussersten Grenze des Violett nach der rothen Seite hin zunimmt; sie erreicht bei einigen Prismen ihr Maximum im Gelb, bei anderen auch im Roth; Prismen von Crownglas und gewöhnlichem weichen Glase haben die grösste Wärme im vollen Roth; Prismen von Flintglas haben das Maximum jenseit des Roth; bei allen Prismen ohne Ausnahme findet noch einige Zoll unter der Grenze des Roth Wärmeerregung statt. Melloni theilte nun das von einem Crownglasprisma erzeugte sichtbare Sonnenspectrum nach den Farben in sieben Theile und setzte diese Theilung über das äusserste Roth in dem dunklen Theile des Spectrums entsprechend fort. Indem er dann den Stand des Multiplicators in den verschiedenen Abtheilungen bei directem Lichte oder auch nach dem vorherigen Durchgange des Lichtes durch eine 1 mm dicke Wasserschicht zwischen parallelen Glaswänden maass, erhielt er folgende Tabelle:

---

dert die Entstehung der Krafteinheit (1000 Kilogrammometer) die Zerstörung von 2,70 Wärmeeinheiten." „Man kann daher den allgemeinen Satz aufstellen, dass die bewegende Kraft in der Natur eine unveränderliche Grösse ist, dass sie im eigentlichen Sinne des Wortes weder geschaffen noch zerstört wird." Die Klarheit und Bestimmtheit dieser Sätze lässt bedauern, dass die betreffenden Arbeiten nicht weiter vollendet und so spät erst veröffentlicht worden sind. Jedenfalls aber machen diese Umstände es unmöglich, Carnot mit den Begründern unserer neuen Kräfteanschauung, Mayer, Joule, Helmholtz u. A., in eine Reihe zu stellen. (Vergl. Rich. Rühlmann, Handbuch der mechanischen Wärmetheorie II, S. 910 bis 912, Braunschweig 1885.)

[1]) Leopoldo Nobili (1784 — 1835, Prof. d. Physik am Grossherzogl. Museum in Florenz): Description d'un thermo-multiplicateur ou thermoscope électrique, Biblioth. univ. XLIV, p. 225, 1830; Pogg. Ann. XX, S. 245, 1830.

[2]) Ann. de chim. et de phys. XLIII, p. 385, 1831. Pogg. Ann. XXIV, S. 640, 1831.

[3]) Abhandl. d. Berl. Akad. 1818 bis 1819, S. 305.

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

| Farbenzonen | Stand des Thermoscops im directen Lichte | Stand des Thermoscops im durchgegangenen Lichte | Verlust beim Durchgange in Theilen der ursprünglichen Temperatur |
|---|---|---|---|
| Violett | 2 | 2 | 0,00 |
| Indigo | 5 | 4,5 | 0,10 |
| Blau | 9 | 8 | 0,11 |
| Grün | 12 | 10 | 0,17 |
| Gelb | 25 | 20 | 0,20 |
| Rothgelb | 29 | 21 | 0,27 |
| Roth | 32 | 20 | 0,37 |
| Mit Rothgelb isotherme Zone | 29 | 14 | 0,52 |
| „ Gelb „ „ | 25 | 9 | 0,64 |
| „ Grün „ „ | 12 | 3 | 0,75 |
| „ Blau „ „ | 9 | 1 | 0,88 |
| „ Indigo „ „ | 5 | 0,5 | 0,90 |
| „ Violett „ „ | 2 | 0 | 1,00 |

Aus dieser Tabelle ging schon hervor, dass es sehr verschiedenartige Wärmestrahlen giebt, die vom Wasser in verschiedenem Grade durchgelassen werden. Zwei Jahre später [1]) wurde Melloni klar, dass verschiedene Substanzen für Wärmestrahlen auch in ganz verschiedenem Grade durchlässig sind, und er benannte diese Eigenschaft entsprechend dem Worte diaphan (auf einen Vorschlag Ampère's hin) mit dem Worte diatherman. Von hundert auffallenden Strahlen einer Argand'schen Lampe liessen 9,2 mm dicke Schichten der folgenden Substanzen z. B. folgende Mengen von Strahlen durch:

| | |
|---|---|
| Spiegelglas | 53 |
| Schwefelkohlenstoff (farblos) | 63 |
| Chlorschwefel (sehr rothbraun) | 63 |
| Terpentinöl (farblos) | 31 |
| Aether | 21 |
| Alkohol (absoluter) | 15 |
| Alaunlösung | 12 |
| Wasser (destillirtes) | 11. |

Für 2,62 mm dicke Schichten ergaben sich entsprechend folgende Zahlen:

| | |
|---|---|
| Steinsalz (klar) | 92 |
| Spiegelglas (klar) | 62. |

[1]) Mém. sur la transmiss. libre de la chaleur rayonnante par différens corps solides et liquides, prés. à l'acad. des sciences, 4. Febr. 1833.

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

Die Diathermansie zeigte sich also merkwürdiger Weise von der Diaphanität unabhängig.

Durch die Diathermansie erklärten sich nun leicht die verschiedenen Lagen des Wärmemaximums im Sonnenspectrum. Da die Strahlen, welche dem rothen Ende des Spectrums entsprechen, am meisten absorbirt werden, so rückt das Wärmemaximum bei weniger diathermanen Substanzen (wie Crownglas) immer weiter nach dem violetten Ende hin, bei Steinsalz aber fällt es am weitesten in den dunklen Theil des Spectrums hinein. Die Absorption der Wärmestrahlen wächst jedoch nicht, wie man wohl vermuthen könnte, proportional der Dicke der betreffenden Substanzen. Bei einer 8 mm dicken Glasscheibe, die man sich in 2 mm dicke Schichten zerlegt denkt, stellt sich der Verlust in der ersten Schicht auf 0,381, in der zweiten auf 0,134, in der dritten auf 0,087 und in der vierten auf 0,058 der ganzen auf jede einzelne Scheibe auffallenden Wärmemenge. Die Thatsache erklärt sich aus der auswählenden Absorption der Scheiben. Die erste Scheibe absorbirt fast alle Wärmestrahlen, die das Glas überhaupt absorbiren kann, und die Strahlen, welche die erste Scheibe durchgelassen, werden überhaupt kaum noch absorbirt.

Im folgenden Jahre untersuchte Melloni auch die von verschiedenen künstlichen Wärmequellen ausgesandten Strahlen [1]). Er fand dabei, dass die verschiedenen Wärmequellen im Allgemeinen alle verschiedenartigen Wärmestrahlen zu gleicher Zeit erzeugen, aber in sehr ungleichen Verhältnissen, ja dass in manchen Wärmequellen auch manche Wärmestrahlen ganz fehlen. Steinsalz zeigte sich wieder als der einzige Körper, der alle Wärmestrahlen, auch die Strahlen verschiedener Quellen, wie Glas alle Lichtstrahlen in gleichem Maasse hindurchlässt [2]). Melloni bewies später auch, dass die Wärmestrahlen, wie die Strahlen des Lichtes, gebrochen und zurückgeworfen werden, und dass diese Zurückwerfung je nach der reflectirenden Oberfläche eine regelmässige oder diffuse ist [3]). Die erstere zeigte sich vor Allem von der Oberfläche der reflectirenden Körper abhängig und war für alle Arten von Wärmestrahlen gleich; die letztere variirte für die einzelnen Strahlen je nach dem Absorptionsvermögen der betreffenden Substanzen in bedeutendem Grade. Aus allen Unter-

---

Ann. de chim. et de phys. LIII, p. 5, 1833. Pogg. Ann. XXXV, p. 112 u. 277, 1835; vorläufige Notizen auch schon in Pogg. Ann. XXVIII, S. 240, 638, 643.

[1]) Nouv. rech. sur la transmiss. immédiate de la chaleur; präs. in d. Akad. am 21. April 1834. Des modifications, qui subissent les transm. calorifiques par le changement de la source rayonnante. Ann. de chim. et de phys. LV, p. 337, 1834; Pogg. Ann. XXXV, S. 385 u. 529.

[2]) Als Wärmequellen benutzte Melloni: 1) eine helle Lampenflamme ohne Einhüllung, 2) eine über Alkohol glühende Platinspirale, 3) einen über der Spirituslampe bis 390⁰ erhitzten kupfernen Tiegel, 4) ein Gefäss mit kochendem Wasser.

[3]) Ann. de chim. et de phys. LXXV. Pogg. Ann. LII, S. 421, 1841.

suchungen Melloni's aber ging als sicher hervor, dass die Gesetze der Licht- und Wärmestrahlen und ihrer Modificationen durch die wägbare Materie, so lange sich die Strahlen frei bewegen können, dieselben sind und dass nur grosse Verschiedenheiten zwischen ihnen entstehen, sobald der strahlende Zustand an der Oberfläche oder im Inneren der Körper eine Unterbrechung erleidet[1]).

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

Für diese Ansicht sprachen auch die Ergebnisse der wieder eifrig betriebenen Forschungen nach einer Polarisation der Wärmestrahlen. Bérard[2]) beobachtete an den mit Lichtstrahlen verbundenen Wärmestrahlen Polarisationserscheinungen, konnte aber in Bezug auf die Polarisation der dunklen Wärmestrahlen zu keinem Resultat gelangen. Aehnlich erging es Baden Powell[3]) und Nobili[4]). Forbes[5]) dagegen constatirte nun, dass wie beim Lichte, auch bei der Wärme auf verschiedene Weise eine Polarisation der Strahlen zu erzielen sei, und er wie Melloni, der auch zuerst bei seinen Versuchen negative Resultate erhalten hatte[6]), führten dann die Untersuchungen sehr schnell zu einem vorläufigen Abschluss[7]).

Melloni's Untersuchungen über strahlende Wärme übten auf die Wärmetheorie einen merkwürdigen Einfluss. Die absolute Aehnlichkeit der Licht- und Wärmestrahlen machte nun, nachdem die Undulationstheorie des Lichtes schon fast allgemein zum Siege gelangt, auch eine Undulationstheorie der Wärme nothwendig. Darüber blieb keinem Physiker ein Zweifel; ob man aber das undulirende Mittel für Licht und Wärme als gleich oder zwei specifisch verschiedene Licht- und Wärmeäther annehmen sollte, darob war man mindestens unsicher, und die meisten Physiker, wie auch Melloni, neigten dem letzteren zu. Nur Ampère, der entschieden eine weitere Ansicht von den Verhältnissen der physikalischen Potenzen hatte, der ja zwei Imponderabilien, Magnetismus und Elektricität schon auf eine Flüssigkeit reducirt, bemühte sich auch hier zu zeigen, dass

---

[1]) Macedonio Melloni (11. April 1798 Parma — 11. August 1854 Portici), war schon 1824 Professor der Physik an der Universität Parma, bis er 1831 wegen seiner Betheiligung an einer revolutionären Erhebung flüchten musste. Nachdem er mehrere Jahre in Paris als Privatmann gelebt, wurde er 1839 Director des Conservatoriums der Künste und Gewerbe in Neapel.

[2]) Gilb. Ann. XLVI, S. 376, 1814.

[3]) Edinb. Journ. of Science, New Ser. III, p. 297, 1830. Pogg. Ann. XXI, S. 311.

[4]) Biblioth. univ. LVII; Pogg. Ann. XXXVI, S. 531, 1835.

[5]) On the refraction and polarization of heat, Edinb. Trans. XIII; Pogg. Ann. XXXV, S. 553. (Die Abhandlung enthält die Abtheilungen: 1) Versuch über die Wärme des Mondlichtes, 2) über die Polarisation der Wärme durch Turmalin, 3) über die Polarisation der Wärme durch Brechung und Reflexion, 4) über die Depolarisation und Doppelbrechung der Wärme.)

[6]) Poggendorff's Ann. XXXV, S. 533, 1835.

[7]) Melloni, Mém. sur la polarisation de la chaleur, Ann. de chim. et de phys. LXI u. LXV; Pogg. Ann. XXXIX, S. 1, 1836 und XLIII, S. 18 u. 257, 1838.

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

ein Aether zur Erklärung der Licht- und Wärmeerscheinungen ausreiche[1]). Nach ihm bestehen die Strahlen eines leuchtenden Körpers aus einer grossen Menge Wellen, von denen die grössere Anzahl auf unserer Haut das Gefühl von Wärme, eine kleinere Anzahl aber in unserem Auge das Gefühl von Licht erregt; die Wellen der dunklen Wärmestrahlen sind länger als die Lichtwellen. Die Leitung der Wärme in den Körpern, welche die Physiker gern noch als einen Beweis für die Existenz eines specifischen, vom Lichtäther unterschiedenen Wärmestoffs ansahen, entsteht dadurch, dass die Atome der Körper die Bewegung der Aetherwellen aufnehmen und dass die so erregten Schwingungen der Atome sich von Molecül zu Molecül fortpflanzen. Die Wärme eines Körpers besteht also in den Schwingungen, welche die Atome innerhalb der Molecüle ausführen.

Da indessen die Physiker von besonderen Atomen im Unterschied von Molecülen noch nichts wissen mochten, und da man doch ausser dem Lichtäther verschiedene andere unwägbare Stoffe noch annehmen musste, so blieb man auch bei der bequemen Annahme eines besonderen Wärmeäthers und liess diesen nur ähnliche Schwingungen wie den Lichtäther machen. Der immer mehr sich hervordrängende Gedanke von der Einheit aller Naturkräfte war damit noch einmal verdeckt und noch einmal, allerdings nur für eine kleine Spanne Zeit, beseitigt.

Die vielfältigen Beschäftigungen mit den Wärmeerscheinungen wirkten klärend auch auf meteorologischem Gebiete. Js. Voss liess den Thau von den Sternen, oder aus grosser Höhe, wenigstens eine Meile hoch fallen. Nach Chr. L. Gersten (1733) stieg derselbe von der Erde auf und blieb in Tropfen an den Spitzen der Blätter hängen. Aehnliche Ansichten hatten Musschenbroeck (Introd. II, p. 987 bis 995) und Dufay, welch Letzterer aber die Elektricität für nicht ganz unbetheiligt an der Thaubildung hielt. Charles Le Roy, als Anhänger der Solutionstheorie, behauptete, die Abends abgekühlte Luft könne die am Tage aufgelösten Dünste nicht mehr gelöst erhalten, und verglich das Thauen mit dem Beschlagen der Fensterscheiben. Allgemeinen Beifall fand erst die Theorie, welche Wells im Jahre 1814 veröffentlichte[2]).

Wells sagt: Man nehme an, dass ein kleiner, die Wärme frei ausstrahlender Körper, welcher, so wie die umgebende Atmosphäre, wärmer als 0° R. sei, bei heller und ruhiger Luft auf eine im Freien liegende, die Wärme wenig fortleitende Fläche gelegt wird, und stelle sich vor, dass über demselben in irgend welcher Höhe in der Atmosphäre eine feste Eisdecke schwebe. Die Folge wird sein, dass der Körper sehr bald kälter sein wird als die umgebende Luft. Denn da seine Wärme nach oben ausstrahlt, so wird er vom Eise dagegen nicht so viel eintauschen

---

[1]) Biblioth. univ. XLVIII, p. 225; Pogg. Ann. XXVI, S. 161, 1832.

[2]) William Charles Wells (1757 bis 1817, Arzt in London): An essay on Dew, London 1814.

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

als er abgiebt; ebenso kann er auch von der Erde keinen Ersatz erlangen, weil ein schlechter Wärmeleiter ihn von derselben trennt. Von der Seite her kann ihm die unbewegte Luft ebenso wenig das Abgehende zuführen. Er muss deshalb nothwendig kälter werden als die Luft, und wenn dieselbe hinlänglich mit Dünsten beladen ist, dieselben auf seiner Oberfläche verdichten. Genau so ist der Hergang, der sich beim Bethauen des Grases in einer hellen und ruhigen Nacht vollzieht. Die oberen Theile des Grases strahlen ihre Wärme in die Regionen des leeren Raumes aus, von wo ihnen keine Wärme zurückkommt, und die unteren lassen wegen ihrer geringen Wärmeleitung nichts von der Wärme der Erde durch; die umgebende Luft liefert nur unbedeutenden Ersatz, und so muss das Gras sich unter die Temperatur der umgebenden Luft abkühlen und dadurch die Dünste an sich niederschlagen. Danach werden also gute Wärmeleiter, wie die Metalle, nicht bethauen, weil ihnen von der Umgebung die ausgestrahlte Wärme wieder ersetzt wird. Bedeckter Himmel wird den Thau hindern, weil er die ausgestrahlte Wärme dem Boden immer wieder zurück giebt, und Winde werden dem Thau nicht günstig sein, weil auch durch sie den abkühlenden Gegenständen die Wärme wieder ersetzt wird. Gegen die Ansicht, welche auch die französischen Mathematiker aufgenommen, dass der Thau der von den Pflanzen aufsteigende Wasserdampf sei, macht Wells geltend, dass auch er nicht zweifle, dass dieser Dampf zum Thauen beitrage; dass dieser Dampf aber nicht der grösste Factor des Thauens sei, gehe daraus hervor, dass trockene Pflanzen ebenso wie frische bethauten [1]).

Der richtigeren Erklärung des Thauens folgte bald das Instrument zur Bestimmung des Thaupunktes, das allerdings nicht zuerst diesen Zweck, sondern vielmehr allgemein den der Bestimmung der atmosphärischen Feuchtigkeit hatte und darum auch schlechthin Hygrometer genannt wurde. Schon Le Roy bestimmte im Jahre 1751 die atmosphärische Feuchtigkeit dadurch, dass er in ein Glas eiskaltes Wasser so lange goss, bis das Glas aussen mit Feuchtigkeit beschlug. Berzelius liess im Jahre 1807 [2]) ein Thermometer mit einer Kugel aus feinpolirtem Stahl versehen, an der man das Eintreten des Beschlagens besser beobachten konnte. Ohne von diesen Versuchen zu wissen, construirte Daniell nach vielerlei vergeblichen Bemühungen sein Hygrometer [3]).

---

[1]) Vergl. Gehler's physik. Wörterb. 2. Aufl. IX, S. 687. An Gersten's Ansicht anknüpfend, hat J. Aitken (Nature XXXIII, S. 256, 1886; Naturw. Rundschau Nr. 15, 1886) in neuester Zeit gezeigt, dass auch die Bodenfeuchtigkeit bei der Thaubildung eine starke Rolle spielt.

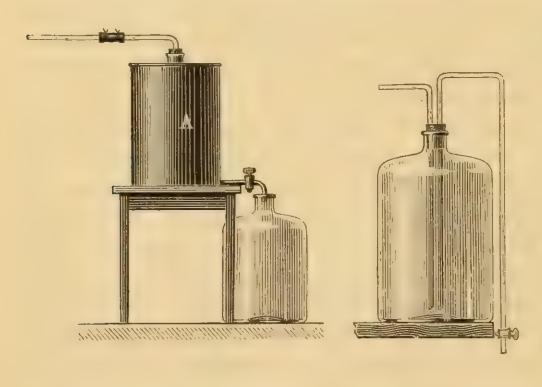
[2]) Afh. i Fysik, Kemi och Mineralogi II, 1807: Förslag till en förbättrad Hygrometer.

[3]) John Frederic Daniell (2. März 1790 London — 13. März 1845 London, zuerst mit verschiedenen industriellen Unternehmungen beschäftigt, von 1831 an Prof. d. Chem. am Kings College in London): On a new Hygrometer, Quarterly Journ. of Science VIII u. IX, 1820; Gilb. Ann. LXV, S. 169, 409; Berzelius (Fortschritte der Physik III, S. 63) setzt die Erfindung des Instruments in das Jahr 1818.

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

Dasselbe hatte direct die noch heute gebräuchliche Einrichtung erhalten, nur waren die beiden Kugeln desselben aus gewöhnlichem Glas hergestellt. Der Mechaniker Greiner in Berlin gab bald darauf der Kugel, in welcher das innere Thermometer sich befindet, um die Aequatorialzone den bekannten Ueberzug von Gold.

Von dem Daniell'schen Hygrometer kam August[1]) zu seinem Psychrometer. Er wollte zwei Thermometer, welche für ein Daniell'sches Hygrometer bestimmt waren, dazu benutzen, die Verdunstungskälte zu messen. Er hing das eine frei auf, umwickelte die Kugel des anderen mit Mousselin und benetzte diesen mit Wasser. Als er dann bemerkt zu haben glaubte, dass die Differenz seiner Thermometergrade der Hälfte der Differenz der Thermometer im Daniell'schen Hygrometer gleich wäre, versah er das nasse Thermometer mit der Einrichtung, wodurch die Kugel desselben immer feucht blieb, brachte beide Thermometer auf ein Gestell und gab dem neuen Instrument den Namen Psychrometer. Doch blieb August nicht bei der Abhängigkeit seines Instrumentes vom Daniell'schen Hygrometer stehen; er entwickelte vielmehr eigene Formeln, nach denen man aus den Angaben seines Instrumentes direct den Thaupunkt sowohl, als auch die Elasticität und die Dichtigkeit des Wasserdampfes in der Luft finden kann. Trotzdem wurde August's Psychrometer nicht so schnell und allgemein aufgenommen, als das Hygrometer von Daniell, und es bedurfte erst der Empfehlung von Männern wie Baumgarten, Bohnenberger und Muncke, bis man die Unsicherheit der Bestimmung des ersten Beschlagens beim Daniell'schen Instrumente,



und somit die Ueberlegenheit des August'schen Psychrometers anerkannte. Das Absorptionsverfahren zur Bestimmung der absoluten Feuchtigkeit der Luft hat de Morveau[2]) zuerst empfohlen, der die Feuchtigkeit eines abgesperrten Luftquantums durch Chlorcalcium absor-

---

[1]) Ernst Ferdinand August (1795 Prenzlau — 1870 Berlin, 1817 Lehrer am Joachimthal'schen Gymnasium, 1827 Director des Cölnischen Realgymnasiums): Ueber das Psychrometer, Pogg. Ann. V, S. 69, 335 und XIV, S. 137, 1825 u. 1828.

[2]) Louis Bernard Guyton de Morveau (1737 Dijon — 1816 Paris, Generaladvocat, dann Prof. d. Chemie in Dijon, von 1794 an Prof. d. Chemie an der École polytechnique in Paris): Description d'un hygromètre pour les gas, Ann. de chim. et de phys. XXXI, 1808; Gilbert's Ann. XXXI, S. 417 bis 420, 1809.

biren liess und die Menge der ersteren durch die Gewichtszunahme des letzteren bestimmte. Einen Aspirator zum Durchleiten grösserer Luftmengen durch eine Absorptionsröhre, die mit Chlorcalcium oder mit in Schwefelsäure getauchtem Asbest angefüllt war, construirte Carl Emanuel Brunner (Professor der Chemie in Bern) um das Jahr 1830[1]). Seine Apparate für genauere und für einfachere Versuche zeigen die nebenstehenden Abbildungen.

Wärmelehre, c. 1820 bis c. 1840.

Die analytische **Mechanik** hatte mit Lagrange ihre Vollendung im Princip erreicht. Eine einzige Formel umfasste alle statischen Probleme, und aus einer eng sich ihr anschliessenden flossen auch die Lösungen aller dynamischen Aufgaben. Die Macht der Analysis, durch eine einzige, ganz allgemeine Discussion alle möglichen Einzelaufgaben mit sicherem Bewusstsein der Nothwendigkeit lösen zu können, zeigte sich in Lagrange aufs Deutlichste. Dafür aber wurden in ihm, wenigstens unabhängigen Geistern, auch die Nachtheile der Analytik offenbar, die häufige Incongruenz ihrer Methoden mit den in der speciellen Beschaffenheit der Aufgabe begründeten, die daraus folgende Unanschaulichkeit und geringe unmittelbare Evidenz und endlich die Schwierigkeit, die Bedeutung der allgemeinen Formeln richtig zu specialisiren.

Mechanik, c. 1815 bis c. 1840.

Lagrange hatte aus dem allgemeinen Satze von den virtuellen Geschwindigkeiten für die Anwendung desselben auf die speciellen Gleichgewichtsprobleme die sechs bekannten Bedingungen und ihre geometrische Bedeutung weitläufig ableiten müssen. Poinsot[2]) griff in seinen Elémens de statique (Paris 1804) zur synthetischen Methode zurück und leitete jene sechs Bedingungsgleichungen geometrisch aus der Möglichkeit der einzelnen Bewegungsarten eines Körpers ab.

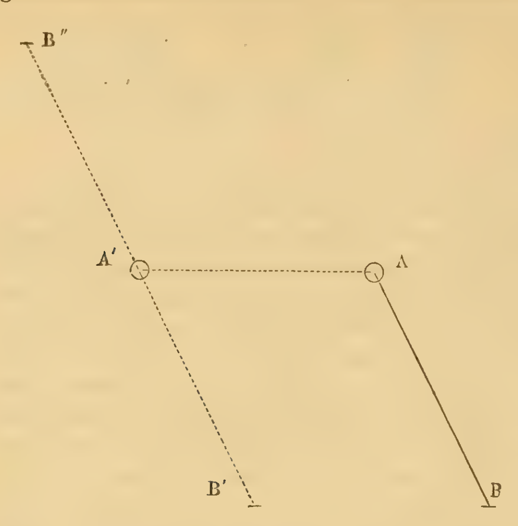
Wenn die wirkenden Kräfte alle an einem Punkte angreifen oder ihre Richtungslinien wenigstens alle nach einem Punkte gerichtet sind, so kann man dieselben nach dem Parallelogramm der Kräfte leicht geometrisch addiren und so ihre Gesammtwirkung graphisch bestimmen. Ist aber das nicht der Fall, so muss man vor der Addition erst alle Kräfte an einen Punkt des Körpers verlegen, und das ist nicht möglich, ohne neue Kräfte einzuführen. Will man die der Strecke $AB$ gleichgerichtete und proportionale Kraft $AB$ an den Punkt $A'$ desselben Körpers verlegt denken, so kann das nicht anders geschehen, als dass man

[1]) Brunner, Bestimmung des Wassergehaltes der Atmosphäre, Pogg. Ann. XX, S. 274, 1830.

[2]) Louis Poinsot (3. Jan. 1777 Paris — 5. Decemb. 1859 Paris), war Professor der Analyse und der Mechanik an der polytechnischen Schule von 1809 bis 1816, dann Examinateur d'admission bis 1825; dabei auch Prof. der Mathematik am Lycée Bonaparte, Mitglied des höheren Unterrichtsrathes und 1852 Senator.

Mechanik, c. 1815 bis c. 1840.

in $A'$ zwei der Kraft $AB$ gleiche und parallele, aber entgegengesetzt gerichtete Kräfte annimmt. Dann bleibt aber ausser der Kraft $A'B'$, die man als die verlegte $AB$ denken kann, noch das Kräftesystem $AB$ und $A'B''$. Diese gleichen und entgegengesetzt parallelen Kräfte haben keine Resultante, lassen sich nicht durch eine einzige Kraft ersetzen, bewirken also keine Translation, sondern nur eine Rotation des Körpers. Poinsot nennt dieses Kräftesystem ein Kräftepaar. Sein Drehungsmoment ist proportional dem Product aus der Grösse der wirkenden Kräfte und ihrer Entfernung. Durch einfache Constructionen lässt sich dann zeigen, dass ein Kräftepaar in seiner Ebene oder auch in parallelen Ebenen beliebig gedreht und verschoben werden kann, dass also die Wirkung desselben nur abhängt von seinem Moment und der Richtung seiner Ebene. Denkt man sich auf dieser Ebene ein Perpendikel errichtet und darauf eine der Grösse des Moments proportionale Strecke aufgetragen, so ist durch diese Strecke und ihre Richtung allein das Kräftepaar vollständig bestimmt. Poinsot nennt diese Strecke die Achse des Kräftepaares. Die Addition von Kräftepaaren in parallelen Ebenen ist damit auf Addition von Strecken zurückgeführt. Wieder durch einfache Constructionen wird danach bewiesen, dass auch Kräftepaare in nicht parallelen Ebenen sich zu einem einzigen Paar zusammensetzen lassen und dass die Achse dieses resultirenden Paares aus den Achsen der componirenden Paare ganz nach dem Parallelogramm der Kräfte gefunden wird.




Welche Kräfte also auch auf einen Körper wirken, immer kann man ihre Wirkungen auf eine Kraft und ein Kräftepaar zurückführen. Die Bedingungen für das Gleichgewicht sind also das Verschwinden der resultirenden Kraft und des resultirenden Kräftepaares oder, geometrisch interpretirt, die Unmöglichkeit einer Translation und einer Rotation des Körpers. Projicirt man noch die Resultante der Kräfte auf drei Coordinatenachsen, das resultirende Kräftepaar auf die drei Coordinatenebenen, und setzt die sechs so erhaltenen Projectionsgrössen einzeln gleich Null, so erhält man die sechs

alten Gleichgewichtsbedingungen der analytischen Mechanik, welche aussprechen, dass weder eine Translation in drei zu einander senkrechten Richtungen, noch eine Rotation um die zu diesen Richtungen parallelen Achsen stattfindet.

Mechanik, c. 1815 bis c. 1840.

Der zweiten Auflage seiner Statik gab Poinsot noch eine besondere Abhandlung, Mémoire sur la composition des Momens et des Aires, bei, theils um die Theorie der Kräftepaare noch mehr aufzuhellen, theils aber auch, um allgemeine, sehr interessante Lehrsätze über die Grösse der resultirenden Kräftepaare anzuzeigen, theils endlich, um die Anwendung der Kräftepaare auf die dynamischen Probleme weiter zu erläutern. Die Tragweite und den Werth seiner neuen mechanischen Methode charakterisirt Poinsot selbst in der Vorrede zur zweiten Auflage der Statik ganz richtig[1]: „Man wird Gelegenheit haben sich zu überzeugen, dass die Bedeutung der Kräftepaare nicht die eines einzelnen Falles, sondern die eines wesentlichen Elementes ist, welches bis dahin in der Mechanik fehlte. . . . Man sieht ausserdem leicht, dass in der Dynamik der Zusammensetzung der Kräftepaare die der Rotationsbewegungen entspricht . . . und dass danach, weil wir uns die Bewegung eines Körpers nur als eine gleichzeitige Translation und Rotation desselben um einen Punkt anschaulich machen können, das Parallelogramm der Kräfte und das Parallelogramm der Kräftepaare die zwei untrennbaren Principien einer vollständigen Analyse der Bewegung eines Körpers von endlicher Grösse sind, die direct aus der Natur der Sache selbst folgen. Endlich wird man bemerken können, wie leicht die Methode der Kräftepaare und wie sehr sie der alten Methode überlegen ist, wenn man sieht, wie aus derselben sogleich alle Eigenschaften des Gleichgewichts, die Theoreme von Euler über die auf die einzelnen Achsen bezogenen Momentensummen eines Kräftesystems, das Maximalmoment, die unveränderliche Ebene der Flächen von Laplace folgen, wie sie uns in den Stand setzt, diese Theile der Mechanik durch neue Theoreme zu vervollständigen, welche sich auf die Centralachse der Momente (wie wir sie genannt haben) und auf die einzige Ebene der Minimalfläche unter den unendlich vielen Maximalflächen beziehen.“

Auf die anschauliche Betrachtung der Bewegung eines Körpers, der möglichen Ueberführung desselben aus einer bestimmten Lage in eine bestimmte andere, die Poinsot schon in der eben erwähnten Vorrede andeutet, kam er erschöpfend in einer neuen fundamentalen Abhandlung, Théorie nouvelle de la rotation des corps (Paris

[1]) Elémens de statique, Paris 1824, p. IX bis X.

Mechanik, c. 1815 bis c. 1840.

1834)[1]) zurück. Er behandelt darin vor Allem die Zusammensetzungen und Zerlegungen von Drehungen, wie die Bewegung eines Körpers um einen festen Punkt. Für die letztere entwickelt er zuerst den charakteristischen Satz, nach dem jede Rotation eines Körpers um einen festen Punkt bewirkt werden kann durch das Rollen eines mit dem Körper fest verbundenen Kegels auf einem anderen festen Kegel, dessen Spitze mit der Spitze des ersteren Kegels immer zusammenfällt.

Diese so begründete Theorie der Bewegung, die rein geometrisch auf Zeit und Kraft keine Rücksicht nahm, wurde später von Rodrigues, Chasles, Möbius etc. weiter entwickelt und fehlt jetzt keinem Lehrbuche der Mechanik. Im Anfange aber brachen sich Poinsot's neue Ideen nur langsam Bahn, die scheinbare Allmacht der Analysis liess die Synthesis nur langsam aufkommen. Poisson und Navier machten um die dreissiger Jahre in ihren Lehrbüchern der Mechanik wenigstens auf die Kräftepaare und Poinsot's Methoden aufmerksam. In Deutschland geschah das nachdrücklich durch Möbius (Lehrbuch der Statik 1837) und Ferdinand Minding (Handbuch der theoretischen Mechanik 1838), und um diese Zeit begann auch in der Geometrie die synthetische Methode wieder sich Geltung zu verschaffen.

Die analytische Mechanik wandelte währenddem, wie natürlich, die Bahnen von Lagrange, doch nicht ohne dass auch sie Umänderungen und mehr oder weniger bedeutende Fortschritte erfuhr. Kein Geringerer als Gauss[2]) versuchte ein neues mechanisches Princip

---

[1]) Wieder abgedruckt in Liouville's Journal de mathématiques pures et appliquées XVI, 1851; übersetzt von Schellbach, Berlin 1851.

[2]) Ueber ein neues allgemeines Grundgesetz der Mechanik, Crelle's Journal für reine und angewandte Mathematik IV, 1829. Gauss' sämmtl. Werke V, S. 23. Vergl. Scheffler, Ueber ein neues Grundgesetz der Mechanik und das Gauss'sche Princip des kleinsten Zwanges, Schlömilch's Zeitschr. f. Math. und Phys. III, S. 197, 1858.

Karl Friedrich Gauss ist am 30. April 1777 in Braunschweig von wenig bemittelten Eltern geboren. Mit Unterstützung des Herzogs Karl Wilhelm Ferdinand besuchte er von 1792 bis 1795 das Collegium Carolinum in Braunschweig, und vom Herbst 1795 bis zum Sommer 1798 die Universität Göttingen. Schon im April seines ersten Studienjahres in Göttingen (1796) konnte er bekannt machen, dass ausser den bekannten regulären Vielecken, wie Dreieck, Viereck, Fünfeck und denen, welche durch wiederholte Verdoppelung der Seitenzahl dieser entstehen, noch eine Menge anderer, z. B. das Siebenzehneck einer geometrischen Construction fähig sind. 1799 promovirte er mit einer Arbeit, in der er bewies, dass jede ganze rationale algebraische Function einer Variablen in reale Factoren ersten oder zweiten Grades zerlegt werden könne. 1801 erschienen seine berühmten Disquisitiones arithmeticae, deren Druck aber schon im Jahre 1798 begonnen hatte. Auf eine Arbeit über die Bahn der Ceres hin sicherte ihm der Herzog von Braunschweig 1802 eine jährliche Pension von 400 Rthlr. zu. 1807 wurde er Professor der Mathematik und Director der Sternwarte in Göttingen. 1809, zweihundert Jahre nach der

aufzustellen, dass direct alle mechanischen Probleme, die statischen wie die dynamischen, in grosser Allgemeinheit zugleich umfassen sollte. Dieses Princip lautet: „Die Bewegung eines Systems materieller, auf was immer für eine Art unter sich verknüpfter Punkte, deren Bewegungen zugleich an was immer für äussere Beschränkungen gebunden sind, geschieht in jedem Augenblick in möglichst grösster Uebereinstimmung mit der freien Bewegung oder unter möglichst kleinstem Zwange.“ Gauss hält dafür, dass dieses Princip von augenblicklicher, augenscheinlicher Evidenz ist und dass es dadurch einen unläugbaren Vorzug vor dem Princip der virtuellen Geschwindigkeit hat. Indessen ist das erstere nur bedingt richtig und damit wird auch das zweite fraglich. Dem Wortlaute nach darf man die augenscheinliche Evidenz jenes Satzes wohl zugeben, dafür aber wird seine mathematische Gestaltung weniger sicher. Das Wort Zwang muss vor Anwendung des Princips erst mathematisch definirt, durch einen mathematischen Ausdruck bestimmt werden, dass aber dieser mathematische Ausdruck dann unter allen Umständen eine minimale Grösse ist, bedarf noch eben so sehr des Beweises als alle anderen vorher aufgestellten Principien. Da nun auch die Anwendung des Gauss'schen Princips vom kleinsten Zwange keine bequemere als die des Princips der virtuellen Geschwindigkeiten ist, so hat das erstere durch seinen Urheber mehr einen Achtungs-, als einen wirklichen Erfolg errungen.

Mechanik, c. 1815 bis c. 1840.

Folgenreicher war die Aufstellung eines neuen, oder vielmehr die Umformung und Erweiterung eines alten mechanischen Princips durch Hamilton [1]). Dem Princip der kleinsten Wirkung Maupertuis', das er als das der stationären Wirkung bezeichnete, setzte Hamil-

---

Astronomia nova Kepler's, erschien das astronomische Hauptwerk Theoria motus corporum coelestium in sectionibus conicis solem ambientium. In der Vorrede kann Gauss von den Kometen ähnlich wie Kepler in seinem Werke (Siehe Bd. II, S. 53 d. W.) von den Planeten reden: „Sie haben in Folge neuer Siege, die durch das Newton'sche Gravitationsgesetz errungen sind, nachdem sie für lange Zeit regellos umher zu irren schienen, und nachdem sie, öfter schon für besiegt gehalten, dennoch als Aufständische und Rebellen sich gezeigt hatten, endlich sich Zügel anlegen lassen und sind aus Feinden Gastfreunde geworden.“ Um das Jahr 1821 erfand Gauss für die grosse hannoversche Gradmessung das Heliotrop. Seit 1831, wo Weber auf seine Veranlassung nach Göttingen berufen worden war, wandte sich Gauss auch physikalischen Arbeiten mehr als früher zu. Er starb in Göttingen am 23. Februar 1855. (Gauss von W. Sartorius v. Waltershausen, Leipzig 1856.)

[1]) William Rowan Hamilton (1805 — 1865, Professor der Astronomie in Dublin): Theory of systems of rays (Transact. of the Royal Irish Acad. XV, p. 80, 1828); On a general method in dynamics, by which the study of the motions of all free systems of attracting or repelling points is reduced to the search and differentiation of one central relation or characteristic function. (Phil. Trans. 1834, p. 247; Second essay, Phil. Trans. 1835, p. 95.)

Mechanik, c. 1815 bis c. 1840.

ton ein erweitertes Princip entgegen, das er das Princip der variirenden Wirkung nannte[1]): Das erstere lautet: Bei jeder ungezwungenen Bewegung eines Massensystems aus einer bestimmten Anfangslage in eine bestimmte andere ist die Wirkung nothwendig stationär (d. h. ihre Variation verschwindet), wenn die inneren Kräfte des Systems conservative sind (d. h. so beschaffen sind, dass sie in gleichen Zeiten gleiche Arbeit leisten). Das Princip der variirenden Wirkung bestimmt dann die Variation der letzteren, wenn die Anfangs- und Endpunkte der freien Bewegung, sowie auch die Arbeit der Kräfte veränderlich sind. Dabei aber war auch mit dem Worte Wirkung, wie man das schon seit Maupertuis bemerkt, wenig ausgerichtet; das Wichtigste und Entscheidende war die mathematische Fassung dieses Begriffs durch Hamilton. Indem dieser die Wirkung durch eine Function aus den Summen der Spannkräfte und der lebendigen Kräfte des Systems bestimmte, zeigte sich nicht bloss, dass das Princip der kleinsten Wirkung, das D'Alembert'sche Princip und die Bewegungsgleichungen von Lagrange bei aller formalen Verschiedenheit doch im Grunde identisch sind, sondern auch, dass die Hamilton'sche Form des ersteren für die allgemeinste Anwendung am bequemsten ist. Nach Kirchhoff[2]) beruht der grosse Nutzen, den das Hamilton'sche Princip gewährt, darauf, dass man mit seiner Hülfe in die Differentialgleichungen der Bewegung eines Systemes materieller Punkte statt der rechtwinkeligen Coordinaten andere Variabeln verhältnissmässig leicht einführen kann. v. Helmholtz betont, dass das Princip der kleinsten Wirkung (in der Hamilton'schen Fassung) höchst wahrscheinlich das allgemeine Gesetz aller Naturprocesse (wenigstens aller umkehrbaren) überhaupt sei. „Daraus ergiebt sich schon jetzt", sagt er, „dass der Gültigkeitsbereich des Princips der kleinsten Wirkung weit über die Grenze der Mechanik wägbarer Körper hinausgewachsen ist, und dass Maupertuis' hochgespannte Hoffnungen von seiner absoluten Allgemeingültigkeit sich ihrer Erfüllung zu nähern scheinen, so dürftig auch die mechanischen Beweise und so widerspruchsvoll die metaphysischen Speculationen waren, welche der Autor selbst für sein neues Princip damals anzuführen wusste" [3]).

Die Arbeiten Hamilton's standen noch nach einer anderen Seite hin mit der Fortentwickelung der Mechanik und der mathematischen Physik

---

[1]) Phil. Trans. 1834, p. 252. Hamilton nennt als Begründer des Princips der kleinsten Wirkung nicht Maupertuis, sondern nur „Lagrange and others". Er bemerkt auch, dass Lagrange, wie Laplace, wie Poisson dem Princip keinen grossen Werth beigelegt, betont aber, dass sein Princip mehr leiste, weil es durch eine einzige Function nicht nur die Differentialgleichungen, sondern die Integrale der Bewegungen auszudrücken erlaube.

[2]) Vorlesungen über mathematische Physik, Leipzig 1874, S. 28 bis 29.

[3]) Journ. f. reine und angewandte Mathematik C, S. 142, 1886.

überhaupt in engem Zusammenhange. Die bestimmte, bequeme Fassung des Begriffs der Wirkung, welche das Princip der kleinsten Wirkung erst eigentlich brauchbar machte, hatte Hamilton dadurch erreicht, dass er neue Functionen in die Betrachtung einführte, vor Allem die Function, welche er mit dem Namen Kraftfunction (force-function) bezeichnete und die directer in die Entwickelung der Physik eingegriffen hat als das Hamilton'sche Princip selbst. Indessen war Hamilton an dieser Stelle, wenn auch originell, so doch nicht der Erste. Sechs Jahre vor ihm, im Jahre 1828, hatte schon Green [1]) dieselbe Function sehr allgemein zur Bestimmung physikalischer Kräfte benutzt und derselben ebenfalls einen besonderen Namen, den der Potential-Function gegeben. Green's Arbeiten aber wurden gar nicht, und Hamilton's im Anfange nur wenig beachtet; allgemeine Verbreitung und Anerkennung erlangte jene Function erst 1840 durch Gauss, der sie kurz mit dem Namen Potential [2]) bezeichnete. Die Benutzung dieser Function zur Bestimmung der Attractionen, die nach dem Gravitationsgesetz wirken, war übrigens schon alt und ist auf das Jahr 1777 zurückzuführen, wo Lagrange [3]) bewies, dass die Differentialquotienten dieser Function nach bestimmten Coordinaten den Kraftcomponenten, welche in die Richtung dieser Coordinaten fallen, gleich sind. Laplace [4]) gab bald darauf die berühmte Differentialgleichung der Function $V$:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0,$$

deren Geltung allerdings Poisson erst noch auf die Punkte einschrän-

---

[1]) George Green (14. Juli 1793 Nottingham — 31. März 1841 Sneinton bei Nottingham, Sohn eines Bäckers und Müllers, setzte anfangs das Gewerbe seines Vaters fort, studirte dann in Cambridge und wurde Fellow des Cajus College daselbst): An essay on the application of mathematical analysis to the theories of electricity and magnetism, Nottingham 1828; mit einer Biographie Green's wieder abgedruckt in Crelle's Journal für reine und angew. Math. XXXIX, XLIV und XLVII. Green's Arbeiten wurden erst um das Jahr 1846 durch W. Thomson's Veröffentlichungen allgemeiner bekannt, auch Hamilton's Methoden verbreiteten sich erst in neuerer Zeit vor Allem durch englische Arbeiten.

[2]) „Allgemeine Lehrsätze in Beziehung auf die im verkehrten Verhältniss des Quadrates der Entfernung wirkenden Anziehungs- und Abstossungskräfte", enthalten im IV. Bande der von Gauss und W. Weber herausgegebenen „Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins" (Göttingen 1839); auch Gauss' Werke V, S. 195.

[3]) Remarques générales sur les mouvements des plusieurs corps qui s'attirent, Mém. de Berlin 1777, p. 155. (Nach R. Baltzer, Zur Geschichte des Potentials, Crelle's Journ. LXXXVI, S. 215, 1878.) Auch Hamilton (Phil. Trans. 1834, p. 249) giebt Lagrange als Entdecker dieser Function an.

[4]) Théorie des attractions des sphéroïdes, Mém. de Paris 1782 (gedruckt 1785); auch Mécanique céleste, liv. III.

Mechanik, c. 1815 bis c. 1840.

ken musste, die ausserhalb der wirkenden Massen liegen. Poisson [1]) zeigte, dass ganz allgemein, ohne Einschränkung, die Gleichung in der Form gilt

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -4\pi k,$$

wo $k$ die Massendichtigkeit in dem betreffenden Punkte bezeichnet und wonach man mit Hülfe des Potentials die Massendichtigkeit für jeden Punkt bestimmen kann.

Die Mathematiker definirten das Potential als die Function, deren Differentialquotienten nach den Coordinaten den Componenten der wirkenden Kraft nach den Coordinatenachsen gleich sind. Als wirkende Kraft war dabei nur an die Gravitation gedacht, und das Potential wurde auch nur zur Lösung von Attractionsproblemen benutzt. Nach Green's Vorgang aber ist das Potential auch in der Theorie des Magnetismus und der Elektricität zu immer grösserer Wichtigkeit gelangt, und mit Hülfe des Potentials hat Green viele Aufgaben über elektrische und magnetische Influenz, wie über die Vertheilung der Elektricität und des Magnetismus auf Körpern rein mathematisch zu lösen vermocht. Weil damit aber das Potential weit über das Gebiet der reinen Mathematik hinaus Bedeutung gewonnen hatte, so hat man in neuerer Zeit den Begriff desselben von der früheren analytisch-mathematischen Definition ganz losgelöst und erklärt nun dasselbe durch seine Beziehung zur mechanischen Arbeit, wodurch man zugleich den für die neuere Physik etwas anrüchig gewordenen Begriff der Kraft ganz umgeht. Danach ist z. B. das elektrische Potential an einem gegebenen Punkte des elektrischen Feldes durch die Arbeit zu messen, welche von elektrischen Kräften geleistet wird, wenn eine Einheit von Elektricität, die diesem Punkte, ohne irgend welche Störungen im elektrischen Felde hervorzubringen, mitgetheilt worden ist, mit dem Punkte bis in die Unendlichkeit (oder bis zu einem Punkte, wo das Potential Null ist) entfernt wird [2]).

Auch die genauere Fixirung des Begriffes der Arbeit selbst und die Einführung desselben in die theoretische Mechanik stammt aus dieser Zeit. Das Product aus der Kraft und der

---

[1]) Bulletin de la soc. philomathique 1812, t. III; Mém. de Paris 1823.

[2]) Vergl. Clerk Maxwell, Lehrb. der Elektricität und des Magnetismus, Berlin 1883, I, S. 75 ff.

Hoppe, Geschichte der Elektricität, Leipzig 1884, S. 330 ff.

Clausius (Die Potentialfunction und das Potential, Leipzig 1867) gebraucht die historischen Namen Kraftfunction, Potentialfunction und Potential für verschiedene Arten der betreffenden Function; indessen ist der Gebrauch nicht allgemein geworden und man unterscheidet öfter die verschiedenen Arten des Potentials durch besondere Zusätze zu diesem Namen.

Mechanik. c. 1815 bis c. 1840.

Wegstrecke gebrauchte man schon im vorigen Jahrhundert vereinzelt bei mechanischen Untersuchungen; Carnot (der Vater) hatte dasselbe 1786 als moment d'activité, Monge als effet dynamique bezeichnet; aber erst Poncelet brachte 1826 für dasselbe den Namen Arbeit (travail) zur Anerkennung. Trotzdem findet sich dieser Name auch schon früher und Young behauptete 1807 ganz allgemein die Proportionalität von Arbeit und lebendiger Kraft. In seinen Lectures on natural philosophy (London 1808, I, p. 78 und 79) sagt er über dieses Verhältniss: „In fast allen Fällen, welche in der praktischen Mechanik vorkommen, ist die Arbeit, welche zum Hervorbringen einer Bewegung aufgewandt werden muss, proportional nicht dem Moment, sondern der Energie der Bewegung, welche durch die Arbeit erhalten wird.“ „Der Ausdruck Energie (aber) darf gebraucht werden zur Bezeichnung des Productes aus der Masse oder dem Gewichte des Körpers in das Quadrat der Zahl, welche die Geschwindigkeit desselben angiebt.“ Diese Aequivalenz von Arbeit und lebendiger Kraft (oder Energie) gebrauchte Poncelet[1]) als vorzüglichstes Hülfsmittel zur Lösung mechanisch-technischer Aufgaben, indem er seinem berühmten Werke: Introduction à la mécanique industrielle (Metz 1829, 2. Aufl. 1841) das principe général de la transmission du travail mécanique als fundamentalen Satz zu Grunde legte. Ueber die Allgemeinheit dieses Principes sagte er charakteristisch (Introduction à la mécanique, 2. Aufl., p. X—XI): In der That führt das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten, wenn man es auf die reellen Bewegungen der Körper anwendet und alle inneren und äusseren Kräfte berücksichtigt, welche die Bewegung vermehren oder vermindern, durch die einfache und rein elementare Summation der erhaltenen Arbeitsquantitäten zum Princip von der Transmission der Arbeit, zur Gleichheit der Summe der lebendigen Kräfte ($mv^2$) und der doppelten algebraischen Summe aller Arbeiten. Von diesem Gesichtspunkte aus gesehen, umfasst dieses Princip alle Gesetze der gegenseitigen Wechselwirkung der Kräfte unter einer Form, welche die Anwendungen derselben auf die technische Mechanik sehr erleichtert, den Theil der Mechanik, welchen man geradezu die Wissenschaft von der Arbeit der Kräfte nennen könnte.

---

[1]) Jean Victor Poncelet (1. März 1788 Metz — 23. December 1867 Paris), Schüler der polytechnischen Schule, wurde im russischen Feldzuge gefangen und kehrte erst 1814 nach Frankreich zurück, von 1815 bis 1825 als Geniehauptmann in Metz, 1825 bis 1835 Professor an der École d'application daselbst, 1835 bis 1848 Mitglied der Befestigungscommission von Paris, von 1838 an auch Professor der mechan. Physik an der Faculté des sciences, 1848 Brigadegeneral.

Mechanik, c. 1815 bis c. 1840.

Am Schlusse des theoretischen Theiles seines Werkes kommt Poncelet noch einmal principiell auf die Transformation der Arbeit zurück und zeigt da (S. 131 u. f.), dass niemals Arbeit oder lebendige Kraft aus Nichts gewonnen oder auch absolut verloren werden, dass vielmehr alle Production von Arbeit oder lebendiger Kraft nur auf einer Transformation dieser Agentien beruhen kann [1]).

Bei alle dem dürfen wir nicht vergessen, dass wir uns hier auf rein mechanischem Gebiete befinden und dass die Begriffe Energie, Arbeit und Potential hier immer nur mechanisch interpretirt werden. Ihre volle Wichtigkeit und ihre weite Bedeutung für die gesammte Physik erhielten alle diese mechanischen Begriffe erst nach der grossen Umgestaltung der Anschauungen von der Natur und der Wirkung der Kräfte, nach der Einsicht in das Gesetz von der Erhaltung der Kraft, mit der wir die nächste Periode der Physik beginnen. Es ist ein sehr interessantes und lehrreiches Thema, die Wechselwirkung dieser neuen Begriffe mit der Idee von der Erhaltung der Kräfte näher zu untersuchen. Unbemerkbar fast tauchen jene neuen Begriffe auf, verbreiten sich, gewinnen in gewissen Kreisen immer mehr an Wirkung, ohne aber die allgemeine Anerkennung zu erringen oder auch nur dringender zu verlangen. Da tritt scheinbar plötzlich das Gesetz von der Erhaltung der Kraft ein, und danach erst zeigen jene Begriffe ihre volle Macht, indem sie selbst die Idee der Kraft ganz umgestalten oder gar verdrängen. So scheint die Idee jenes Gesetzes erst diese Begriffe zu befruchten; eine tiefere Untersuchung aber dürfte vielleicht zeigen, dass umgekehrt jene Begriffe erst nach und nach das Gesetz mit erzeugt oder wenigstens ermöglicht haben.

Hatte man bei diesen Begriffen noch vor Allem die Wirkung der Körper nach Aussen im Auge, so vernachlässigte die mathematische Physik doch auch die Untersuchungen der inneren Veränderungen der Körper nicht. Die Untersuchungen über die Doppelbrechung und Polarisation des Lichtes durch die verschiedenen Substanzen und die zu ihrer Erklärung von Fresnel begründete Theorie der Elasticität der Körper regten die bedeutendsten Mathematiker zu weiterem Verfolge dieser Untersuchungen an. An erster Stelle ist hierfür, neben dem schon viel erwähnten Poisson, Cauchy zu nennen, der alle Gebiete

---

[1]) Gleiche Wege wie Poncelet ging um dieselbe Zeit Gustave Gaspard Coriolis (1792—1843, Studiendirector an der École polytechnique); etwas früher, aber weniger nachdrücklich und absichtlich hatte auch Navier den Begriff der Arbeit in der Theorie der Maschinen verwandt. Poncelet macht in seinem Werke (p. X) selbst darauf aufmerksam, dass er in einer für seine Schüler bestimmten Schrift vom Jahre 1826 noch den Ausdruck travail mécanique mit dem anderen quantité d'action abwechselnd gebraucht und dass er erst auf die Aufmunterung Coriolis' hin den ersteren ausschliesslich angenommen habe.

der Physik, Elektricität und Magnetismus nur ausgenommen, dem mathematischen Calcül zu unterwerfen versuchte. Leider sind seine mathematisch unschätzbaren Arbeiten für die Physik nicht von gleich unzweifelhaftem Werthe. Einestheils entbehren die Hypothesen über die Constitution der Materie, welche er als Grundlage des mathematischen Calcüls nothwendig bedurfte, der zwingenden Evidenz, und andererseits stimmen die daraus deducirten Resultate nicht so vollkommen mit den experimentellen Erfahrungen, dass dadurch die Sicherheit jener Hypothesen rückwärts vollauf bestätigt würde. Ja man hat von gewissen Seiten her Cauchy's, und in geringerem Maasse auch Poisson's Arbeiten, gerade dazu benutzt um zu zeigen, dass die mathematische Deduction, ebenso wie die philosophische, zur Erlangung sicherer Naturgesetze, ohne eine immerwährende Beihülfe der Empirie, unfähig sei.

Wie schon angedeutet, betrafen die Untersuchungen Poisson's und Cauchy's nach ihrer mechanischen Seite hin vor Allem die Theorie der Elasticität und die Fortpflanzung von Bewegungen in elastischen Mitteln. Dabei kamen beide zu merkwürdigen Consequenzen über die Natur der Materie, welche für die herrschende Atomentheorie von grosser Wichtigkeit schienen. Laplace hatte darauf aufmerksam gemacht, dass die Mathematiker bei ihren Integrationen die Materie wie ein Continuum behandelten und so mit der Atomistik principiell in Widerspruch träten, hatte aber hinzugefügt, dass dieser Widerspruch bei dem Ueberwiegen des erfüllten gegenüber dem leeren Raume im Erfolg jedenfalls verschwinde. Poisson [1]) kam später (vor Allem durch seine Beschäftigung mit der Undulationstheorie des Lichtes) zu der Ueberzeugung, dass die Annahme einer continuirlichen Raumerfüllung behufs von Integrationen nur erlaubt sei, wenn einzig und allein Wirkungen nach aussen ins Spiel

---

[1]) Siméon Denis Poisson ist am 21. Juni 1781 in Pithiviers, Département Loiret, geboren; sein Vater, früher Soldat, war damals ein kleiner Beamter. Als der junge Poisson das nöthige Alter erreicht, schickte man ihn zu einem verwandten Chirurgen in die Lehre (den geistigen Anstrengungen, welche ein Notariat erfordert, hielt ihn der Familienrath nicht für gewachsen), aber hier zeigte er sich gänzlich unbrauchbar. Dagegen hielt er auf der polytechnischen Schule, in welche er 1798 eintrat, immer den ersten Platz. Schon zu Anfang des Jahres 1800 wurde er Repetent, 1806 an Stelle Fourier's Professor, 1808 Astronom am Längenbureau, 1809 Professor der rationellen Mechanik an der Faculté des Sciences, 1812 an Legendres' Stelle Examinator bei der Artillerie, 1816 an Lacroix's Stelle Examinator der Abiturienten der polytechnischen Schule, 1820 conseiller de l'université, 1835 Pair von Frankreich. Er starb am 25. April 1840 in Paris. Poisson war als Gelehrter von erstaunlichem Fleisse, noch in den letzten Jahren seines Lebens nahm er sich vor, die gesammte mathematische Physik in einem Werke, von dem aber nur die ersten Bände erschienen sind, zu bearbeiten. Als Lehrer war er von gründlicher Gewissenhaftigkeit und seltener Klarheit. Das von ihm selbst zusammengestellte Verzeichniss seiner Arbeiten (Arago's Werke II, S. 552) umfasst 17 Octavseiten.

Mechanik, c. 1815 bis c. 1840.

kämen und in Betracht gezogen würden, und dass im anderen Falle statt der Integrale die Summen endlicher Differenzen beibehalten, die Materie also als discontinuirlich, aus getrennten Theilen bestehend, in Rechnung gezogen werden müsse. Ihm folgte auf demselben Wege Cauchy[1]), der ganz allgemein die Mechanik eines Systems materieller Punkte oder Molecüle, welche beliebig im Raume vertheilt und von gegenseitigen Anziehungs- und Abstossungskräften gehalten sind, behandelte. Die Kräfte setzte er dabei, wieder möglichst allgemein, den Producten aus den wirkenden Massen in eine (unbestimmte) Function ihrer Abstände gleich. Wurde in den Massensystemen die Elasticität nach verschiedenen Richtungen verschieden angenommen, so erhielten die Formeln eine grosse Menge von Constanten; für Systeme mit drei zu einander rechtwinkeligen Elasticitätsachsen reducirte sich die Zahl jener Constanten auf sechs, die durch Beobachtung der Schallgeschwindigkeit nach verschiedenen Richtungen bestimmt werden konnten. Cauchy[2]) wie Poisson[3]) benutzten ihre Formeln zur Ableitung der Gestaltveränderung einfach geformter elastischer Körper durch bestimmte Zug- oder Druckkräfte, zur Bestimmung der Schwingungen von Stäben, Platten, Membranen, Saiten u. s. w., und endlich, der Erstere wenigstens, zur weiteren Ausbildung der Undulationstheorie des Lichtes, worauf wir noch zurückkommen werden. Cauchy wie Poisson versuchten auch beide die Resultate ihrer Entwickelungen durch Messungen zu verificiren, indessen war dabei Cauchy weniger erfolgreich als Pois-

---

[1]) Augustin Louis Cauchy, am 21. August 1789 in Paris geboren, wurde schon 1816 Mitglied der Akademie und bald auch Professor an der polytechnischen Schule, deren Zögling er war. Nach der Julirevolution lebte er längere Zeit als Erzieher des Herzogs von Bordeaux in Prag, kehrte dann aber wieder nach Paris zurück und lehrte Mathematik und mathematische Astronomie. Er starb am 23. Mai 1857 in Sceaux bei Paris. Die Abhandlungen Cauchy's folgten vom Jahre 1840 an mit sehr grosser Geschwindigkeit auf einander, nach Poggendorff (Biogr. Handwörterb. I, S. 400) enthalten die Compt. rend. mehr als 500 Aufsätze, Briefe etc. von Cauchy. Arago (Werke II, S. 525) macht darüber die malitiöse, aber vielleicht nicht ganz treffende Bemerkung: „Das Publicum im Allgemeinen, und das wissenschaftliche Publicum insbesondere, glaubt nicht, dass Jemandem die Gabe verliehen sei, jede Woche eine Entdeckung zu machen."

[2]) Exercises de mathématiques, 1826 bis 1836; die Untersuchungen über die Elasticität vorzüglich im II. bis IV. Bande, die Mechanik eines discontinuirlichen Massensystems im III. bis IV. Bande. Eine kürzere Darstellung der Cauchy'schen Untersuchungen über die Wellenbewegung in Dove's Repertorium der Physik, VII.

[3]) Mém. sur l'équilibre et le mouvement des corps élastiques, Mém. de l'acad. VIII, Paris 1829; Mém. sur la propagation du mouv. dans les milieux élast., Mém. de l'acad. X, 1831. Vorher auch aus den Ann. de chim. et de phys. in Pogg. Ann. XII, p. 516; XIII, p. 383, 400; XIV, p. 177.

son, der überhaupt mehr numerische Bestimmungen als der Erstere gab. Eine solche Bestimmung vorzüglich hat lange Zeit auch das Interesse der Experimentalphysiker wach erhalten. Poisson fand aus seinen Formeln, dass bei einer Saite oder einem Draht die durch einen Zug entstandene Verlängerung vier Mal so gross ist als die Verkürzung des zur Zugrichtung senkrechten Durchmessers; Versuche von Cagniard de Latour [1]) bestätigten dies Resultat. Wertheim [2]) aber fand später durch Messungen statt jener Zahl 4 die Zahl 3, und danach ist wahrscheinlich geworden, dass diese Zahl überhaupt für verschiedene Substanzen auch verschiedene Werthe erhält.

Mechanik, c. 1815 bis c. 1840.

Um die hauptsächlichsten Erfolge der mathematischen Mechanik um diese Zeit anzudeuten, bleibt uns noch der wunderbaren Untersuchungen Jacobi's [3]) über die Gleichgewichtsfigur rotirender incompressibler Flüssigkeiten zu erwähnen. Seit Maclaurin's Treatise of Fluxions war man überzeugt, dass eine frei im Raume rotirende incompressible Flüssigkeit unter dem Einfluss der Centrifugalkraft die Form eines Rotationsellipsoids annehmen müsse. Jacobi erzählt, dass er durch Pontecoulant's Behauptung, nur Rotationskörper könnten Gleichgewichtformen sein, „vermöge des Geistes des Widerspruchs, dem er seine meisten Entdeckungen verdanke", zu einer eigenen Untersuchung dieses Problems getrieben worden sei. Wirklich ergab dann diese Arbeit das wunderbare Resultat, dass eine um eine Achse rotirende Flüssigkeit bei einem gewissen Verhältnisse des Quadrates der Winkelgeschwindigkeit zur Dichte und der Attractionskraft der eigenen Flüssigkeitsmolecüle auch von einem Rotationsellipsoid abweichen und zu einem dreiachsigen Ellipsoid werden könne [4]); ein Resultat, das ein vorher nie geahntes Licht über die mögliche Form des Erdkörpers und der Himmelskörper überhaupt warf.

Den obigen Untersuchungen schliessen wir am besten die Versuche zu einer weiteren Ausbildung der Theorie der Capillarität an, die indess einen weniger rein mathematischen Charakter als die vorher erwähnten zeigen und stärker von der Beobachtung abhängig und mehr

---

[1]) Ann. de chim. et de phys. XXXVI, 1827; Pogg. Ann. XII, S. 516, 1827; XIII, S. 394, 1828.

[2]) Ann. de chim. et de phys. (3) XXIII, 1848; Pogg. Ann. LXXVIII, S. 381 u. 476, 1849.

[3]) Karl Gustav Jacob Jacobi (10. Decemb. 1804 Potsdam — 18. Febr. 1851 Berlin), war bis 1827 Privatdocent in Berlin, danach Prof. der Mathematik in Königsberg bis 1842, lebte dann als Mitglied der Akademie und königl. Pensionär in Berlin. Der Erfinder der Galvanoplastik war sein Bruder.

[4]) Jacobi theilte dieses Resultat der Pariser Akademie am 20. Octob. 1834 mit. Die Abhandlung Jacobi's „über die Figur des Gleichgewichts" findet sich in Pogg. Ann. XXXIII, S. 229, 1834. Eine kurze Darstellung der Jacobi'schen Untersuchungen auch in Schell, Theorie der Bewegung und der Kräfte, Leipzig 1880, II, S. 609 bis 618.

Mechanik, c. 1815 bis c. 1840.

mit der Experimentalphysik in Verbindung geblieben sind. Gauss[1]) behielt zur Erklärung der Capillaritätserscheinungen die Postulate Laplace's bei und versuchte nur die Ableitung und Begründung der Gesetze strenger zu gestalten. Ein neues Moment dagegen, die Veränderung der Dichte und die Spannung der Flüssigkeiten an ihrer Oberfläche führte Poisson[2]) in die Theorie ein. Graf Rumford hatte aus dem Schwimmen von Nähnadeln etc. auf der Oberfläche des Wassers geschlossen, dass an einer solchen Oberfläche ein Flüssigkeitshäutchen sich bilde. Poisson erklärte nun, dass jede Theorie, welche nicht auf die Veränderung der Dichte an der Oberfläche Rücksicht nehme, zur Erklärung der Capillaritätserscheinungen ungenügend sein müsse. Jeder Punkt im Inneren einer Flüssigkeit, welcher von der Grenze desselben weiter entfernt sei, als der Radius der Wirksamkeit der Molecüle angebe, erleide von allen Seiten die gleiche Einwirkung; ein Punkt dagegen, dessen Entfernung von der Begrenzungsfläche noch innerhalb dieser Grösse liege, unterliege nach den verschiedenen Seiten hin der Einwirkung ungleicher Kräfte, durch welche also die Dichte der Flüssigkeit innerhalb jener Wirkungssphären eine veränderliche und eine andere als ausserhalb derselben werde. Arago (Werke II, S. 520) bedauert das Urtheil, welches Poisson über die Theorie von Laplace fällt. „Man wird fragen“, sagt er, „wie es möglich ist, dass Laplace die Erscheinungen der Capillaranziehung in Zahlen darstellen konnte, wenn er in seiner Rechnung die wahre und einzige Ursache dieser Phänomene vernachlässigt hat. Ich muss gestehen, es liegt hier ein grosser mathematischer Skandal, welchen Diejenigen zu beseitigen sich beeilen mögen, welche hinreichend Zeit und Talent haben, um zwischen so grossen Geistern wie Laplace und Poisson eine Entscheidung zu fällen. Es handelt sich dabei um die Ehre der Wissenschaft.“ Die meisten Lehrbücher der Experimentalphysik dagegen behandelten die Poisson'sche Theorie nicht wie einen Gegensatz, sondern wie eine Verbesserung der Laplace'schen Erklärung, wonach nur die Erscheinungen der Capillarität nicht bloss von einer Wirkung der Röhrenwände auf die angrenzenden Flüssigkeitsflächen, sondern auf etwas weitere Schichten abgeleitet werden müssten. Dabei hat aber auch nach Poisson die mathematische Theorie, bei ihrer Unsicherheit über das Wesen der Molecularkräfte, die in der Annahme einer verschiedenen Oberflächendichte liegenden Schwierigkeiten nicht ganz überwältigen können. Kirchhoff[3]) sagt in seinen Vorlesungen über

---

[1]) Principia generalia figurae fluidorum in statu aequilibrii, Comm. de soc. Gött. VII, Sept 1829; Sämmtl. Werke V, S. 29.

[2]) Nouvelle théorie de l'action capillaire, Paris 1831 (Erschien als 1. Band eines Traité de physique mathématique; der zweite folgte 1834 unter dem Titel Théorie mathématique de la chaleur); auszugsweise in Pogg. Ann. XXV, S. 270 u. XXVII, S. 193, 1832.

[3]) Vorlesungen über die mathematische Physik: Mechanik, Leipzig 1876, S. 160.

Mechanik am Schlusse des Abschnittes über Capillarität: „Bei einer Flüssigkeit, auf welche Capillarkräfte wirken, ändert sich der Druck im Innern gerade so, als ob diese Kräfte nicht vorhanden wären, aber unendlich nahe an der Oberfläche ändert er sich unendlich schnell. Die Capillarkräfte, die auf Theilchen wirken, welche in endlicher Entfernung von der Oberfläche liegen, heben sich nämlich auf, an der Oberfläche aber geben sie unendlich grosse Resultanten. Hierdurch werden bei der Untersuchung der Capillarerscheinungen Schwierigkeiten herbeigeführt, wenn man den genannten Begriff benutzen will; wir haben diese vermieden, indem wir einen anderen, zuerst von Gauss betretenen Weg eingeschlagen haben.“ Der Zusammenhang der Capillaritätserscheinungen mit den Molecularkräften, der die mathematische Untersuchung der ersteren so erschwerte, regte umgekehrt zu neuen experimentellen Untersuchungen an, die bis dahin ziemlich geruht, und liess hoffen, durch solche zu einer näheren Kenntniss jener Kräfte zu gelangen. Link [1]) veröffentlichte zahlreiche Versuche über die Steighöhen von Wasser, Alkohol, Aether, Schwefelsäure, Salpetersäure, Salzsäure, Kalilauge etc. in Glas, Kupfer, Zink etc. Frankenheim [2]) versuchte in einer grossen Arbeit vom Jahre 1835 einen neuen Ausdruck speciell für die Cohäsion der Flüssigkeiten, den der Synaphie, einzuführen und meinte aus seinen Versuchen schliessen zu dürfen, dass ein grösseres Atomgewicht eine geringere Synaphie und ein geringeres Lichtbrechungsvermögen eine höhere Synaphie bedinge. Degen [3]) bewies, dass die Netzbarkeit eines Körpers von dem Zustande seiner Oberfläche abhängt und durch Liegen an der Luft, durch Reiben mit anderen Körpern, durch Poliren etc. stark verändert wird.

Mechanik, c. 1815 bis c. 1840.

Aehnliche Hoffnungen und ähnliche Schwierigkeiten wie die Capillarität brachte die Entdeckung oder besser die erneute Beschäftigung mit den endosmotischen Erscheinungen. Die erste Nachricht über eine endosmotische Erscheinung stammt von Nollet, der um das Jahr 1748 die Ausgleichung von Wasser und Alkohol durch eine Schweinsblase hindurch beobachtete [4]). G. F. Parrot beschrieb diesen und einige andere ähnliche Versuche in seiner Uebersicht des Systems der theoretischen Physik (Dorpat 1809 bis 1811). Fischer [5]) ging im

[1]) Heinr. Friedr. Link (1767 — 1851, seit 1815 Prof. der Botanik in Berlin): Pogg. Ann. XXIX, S. 404, und XXXI, S. 593, 1833 u. 1834.

[2]) Moritz Ludwig Frankenheim (29. Juni 1801 Braunschweig — 14. Januar 1869 Dresden, von 1827 bis 1866 Prof. der Physik in Breslau, dann pensionirt): Die Lehre von der Cohäsion, umfassend die Elasticität der Gase, die Elasticität und Cohärenz der Flüssigkeiten und festen Körper, und die Krystallkunde; Breslau 1835.

[3]) Aug. Friedr. Degen (1802 — 1850, Prof. der Physik und Chemie in Stuttgart): Versuche über die Netzbarkeit, Pogg. Ann. XXXVIII, S. 449, 1836.

[4]) Siehe Pogg. Ann. LXIII, S. 350, 1844.

[5]) Nicolaus Wolfgang Fischer (1782 — 1850, praktischer Arzt, dann Prof. der Chemie in Breslau): Ueber die Reduction eines Metalles

Mechanik, c. 1815 bis c. 1840.

Jahre 1822 näher auf diese Erscheinungen ein, brachte dieselben aber in eigenthümlicher Weise mit chemischen Vorgängen in Verbindung. Wenn man eine Röhre von Glas an einem Ende mit thierischer Blase überbindet, Wasser in dieselbe giesst und sie in ein Gefäss hängt, in welchem eine Auflösung von Kupfervitriol sich befindet, so zeigt sich nach Fischer keine andere Wirkung, als dass das Kupfersalz sich allmählich nach oben in dem Wasser verbreitet. Bringt man ein Stück Silber in die Röhre, so verändert sich dadurch der Vorgang noch nicht; nimmt man aber statt des Silbers ein Metall, durch welches das Kupfer gefällt wird, z. B. Eisen, so steigt die Flüssigkeit allmählich durch die Blase hinauf, und wenn die Flüssigkeit aussen und innen zu Anfang des Versuchs gleich hoch stand, so steht sie nach ein paar Stunden in der Röhre um 2 bis 3 Zoll höher als aussen. Fischer meint, dass diese Erscheinung zu denen gehöre, welche Erman entdeckt habe, und welche beweisen, dass die Hervorbringung von mechanischer Cohärenz und chemischer Verwandtschaft dasselbe ist. Einige Jahre später kam Dutrochet[1]) durch zahlreiche Versuche zu der Ansicht, dass mit diesen Vorgängen Niveauveränderungen immer nothwendig verbunden sein müssten, weil offenbar nicht nur die eine Flüssigkeit, sondern beide durch die thierische Blase hindurchströmten, und weil dabei die Geschwindigkeiten des Strömens für beide Flüssigkeiten ganz verschiedene seien. Dutrochet ist der erste Physiker, der sich über die Bedeutung dieser Erscheinungen wirklich klar wurde, und er war es auch, der das Wandern der Flüssigkeiten mit dem Namen Endosmose und Exosmose bezeichnete.

Von diesen Entdeckern scheint, Parrot ausgenommen, jeder nachfolgende von den vorhergehenden unabhängig gewesen zu sein; gerade Parrot aber hat längere Zeit den Ruhm des ersten Entdeckers gehabt. Späteren Angriffen gegenüber vertheidigte er sich: es sei ihm nie eingefallen, sich in dieser Beziehung die Priorität zuzueignen, er selbst habe vielmehr gleich nach dem Erscheinen des Dutrochet'schen Werkes die Pariser Akademie auf Nollet aufmerksam gemacht[2]). Ueber die Ursachen der endosmotischen Erscheinungen gingen lange die Ansichten sehr auseinander; Berzelius[3]) schloss aus den Fischer'schen Versuchen, dass die Bewegungen von dem elektrochemischen Gegensatze

---

durch ein anderes, und über die Eigenschaft der thierischen Blase, Flüssigkeiten durch sich hindurchzulassen, und sie in einigen Fällen anzuheben, Gilbert's Ann. LXXII, S. 300, 1822.

[1]) René Joaquim Henri Dutrochet (1776 — 1847, Arzt in Paris): Agent immédiat du mouvement vital, Paris 1826. Nouv. rech. sur l'endosmose et l'exosmose, Paris 1828; auch Ann. de chim. et de phys. XXXV und XXXVII. (Spätere Abhandlungen in Bd. XLIX, LI, LX dieser Ann.); Pogg. Ann. X, S. 162; XI, S. 138; XII, S. 617; XXVIII, S. 359.

[2]) Pogg. Ann. LXVI, S. 595 und LXX, S. 171: Zur Geschichte der Endosmose.

[3]) Jahresberichte über die Fortschritte der Physik und Chemie III, S. 198 bis 201, 1823.

zwischen der Flüssigkeit und dem festen Körper abhängen. Dutrochet suchte die Ursache derselben zuerst in einer eigenthümlichen Lebenskraft der organischen Gewebe, kam aber, als er die Erscheinungen auch an Scheiben von gebranntem Thon bemerkte, zur Ansicht, dass Elektricität in eigenthümlicher Weise darin wirksam sei. Magnus [1]) nahm die Capillarität als Grundursache der Endosmose an, dasselbe behauptete Poisson. Dutrochet gab auch das als theilweise richtig zu, meinte aber, dass diese Ursache die Endosmose doch nicht ganz erkläre.

An Gasen beobachtete die endosmotischen Erscheinungen zuerst Graham [2]) um das Jahr 1830. Er schloss eine Glasröhre an dem einen Ende mit einem bei 93° getrockneten Gipspfropf, füllte dieselbe mit dem zu untersuchenden Gas, sperrte dasselbe durch Quecksilber ab und beobachtete die Zeiten, nach welchen das Gas sich vollständig mit atmosphärischer Luft ausgewechselt hatte, sowie das Verhältniss der dabei eingetauschten Volumina. Er fand dadurch das merkwürdige Gesetz, dass jene Verhältnisse der Gasvolumina und des Volumens der ausgetauschten Luft den Quadratwurzeln aus den Dichten der Gase (bezogen auf atmosphärische Luft) umgekehrt proportional seien. Wie Gipspfröpfe wirkten dabei auch organische Häute, nur dass durch diese die Diffusion viel langsamer von Statten ging. Graham gab in einer Tabelle die Dichten und Verhältnisse der ausgetauschten Gasvolumina bis auf 10 000 stel genau. Berzelius (Jahresber. XIV, S. 84, 1834) meint dazu, es lohne sich nicht der Mühe, da, wo die Versuche so viele Fehlerquellen zeigten, auch nur 1000 stel anzugeben. Bunsen [3]) hat später auch gezeigt, dass das Graham'sche Gesetz nicht ganz genau ist, dass bei jenen Erscheinungen, wie die Natur der Diaphragmen, auch die Druckverhältnisse in beiden Gasen eine grosse Rolle spielen. Nach der mechanischen Gastheorie aber gilt das Gesetz doch wenigstens genau für die freie Dalton'sche Diffusion der Gase, die von den Molecularkräften einer Scheidewand nicht beeinflusst wird.

Die Wirkungen der Molecularkräfte zeigten sich auch in der Absorption der Gase durch feste Körper. Fusinieri und Bellani schlossen schon aus den Schwierigkeiten der Herstellung vollkommen luftfreier Barometer, dass die Luft an der Oberfläche der festen Körper als starre Schicht sich anhängt. Faraday [4]) erklärte die sogenannte katalytische Wirkung des Platins auf Knallgas durch

---

[1]) Heinrich Gustav Magnus (1802 — 1870, Prof. der Physik und Technologie in Berlin). Ueber Capillaritätserscheinungen, Pogg. Ann. X, S. 153, 1827.

[2]) Philosophical Magazine (3), II, p. 175, 269, 351. — Pogg. Ann. XXVIII, S. 331, 1833.

[3]) Gasometrische Methoden, Braunschweig 1857.

[4]) Phil. Trans. 1834; Pogg. Ann. XXXIII, S. 149, 1834.

Mechanik, c. 1815 bis c. 1840.

die verdichtete Luftschicht, welche an der Oberfläche von reinem Platin haftet. W. C. Henry[1]) fügt dem noch erläuternd hinzu, dass unedle Metalle keine katalytische Wirkung ausüben können, weil sie den angezogenen Sauerstoff chemisch binden. Dem gegenüber liess sich erwarten, dass man auch durch mechanische Mittel, durch Compressionen die Gase so weit zu verdichten vermöchte, dass in den Gasgemischen Molecularkräfte als chemische Kräfte wirksam würden. Lenz und Parrot[2]) jedoch kamen bei ihren diesbezüglichen Versuchen mit Wasserstoff und Sauerstoff oder atmosphärischer Luft zu durchaus negativen Resultaten. Man schloss daraus auf die Kleinheit aller verfügbaren mechanischen Kräfte gegenüber der Grösse der Molecularkräfte. Dieser Vorstellung entsprachen denn auch die Messungen der Compressibilität flüssiger Körper. Nach manchen früheren fruchtlosen Versuchen gelang es Oersted[3]) um das Jahr 1822 genauere Werthe für die Compressibilität und die Elasticität des Wassers und einiger anderer Flüssigkeiten zu erhalten, dadurch, dass er den Druck nicht bloss auf das Innere, sondern auch auf das Aeussere des Compressionsgefässes wirken liess und so eine Ausdehnung desselben verhinderte[4]). Wie erwartet, fand auch er für die Compressibilität des Wassers im Verhältniss zum aufgewandten Druck nur einen sehr geringen Werth, nämlich für eine Druckvermehrung gleich dem Druck der Atmosphäre eine Volumverminderung des Wassers um 0,000047 des ursprünglichen Volumens. Wenig grösser, nämlich 0,0000513, war die Zahl, welche Colladon und Sturm[5]) einige Jahre später für dieses Verhältniss erhielten.

Auch Bewegungserscheinungen von Flüssigkeiten, die durch Molecularkräfte beeinflusst werden, studirte man um diese Zeit. Savart[6]) beobachtete eigenthümliche Erscheinungen an den Strahlen ausfliessenden Wassers. Ein Wasserstrahl, so beschreibt er seine Entdeckung, der aus einer kreisrunden Oeffnung in einer dünnen Wand ausfliesst, ist nur dicht an der Oeffnung klar; dann wird er schmäler, trüb und unklar, man sieht, dass er aus einer Anzahl verlängerter Anschwellungen zusammengesetzt ist, deren Durchmesser stets grösser als der der Oeffnung ist. Der unklare Theil besteht aus nicht zusammenhängenden Tropfen, die jene Formveränderung erleiden. Sie

---

[1]) Philosoph. Magazine (3), VI, p. 354; Pogg. Ann. XXXVI, S. 150, 1835.

[2]) Pharmac. Centralblatt 1834, No. 55.

[3]) Denkschriften d. Kopenhagener Soc. 1822. Pogg. Ann. IX, S. 603, 1827; XII, S. 158, 513; XXXI, S. 361.

[4]) Canton hatte schon 1761 dieselbe Methode angewandt, aber dabei Luft als Compressionsmittel benutzt, die sich wohl theilweise im Wasser löste. Oersted vermied diese Fehlerquelle, indem er Wasser durch Wasser comprimirte.

[5]) Ann. de chim. et de phys. XXXVI, p. 113 und 225, 1827; Pogg. Ann. XII, S. 39, 161. Die Abhandlung von Colladon und Sturm wurde durch die Pariser Akademie gekrönt. Der Name piézomètre kommt zuerst in dieser Abhandlung vor.

[6]) Ann. de chim. et de phys. LIII bis LV; Pogg. Ann. XXIX, S. 356 und XXXIII, S. 451, 520, 1833.

entstehen durch eine periodische Folge von Pulsationen, die so schnell sind, dass sie hörbare Töne geben; ihre Schnelligkeit steht zu der Schnelligkeit des Ausflusses in einem geraden, und zum Durchmesser der Oeffnung im umgekehrten Verhältniss. Wenn sich zwei Gefässe unter gleichem Druck frei entleeren und ihre Wasserstrahlen direct wider einander stossen, so ist der Ausfluss in beiden gleich, die Oeffnungen mögen gleich gross sein oder nicht, die Gefässe gleichen Inhalt haben oder nicht. Wird die Wasserhöhe in beiden Gefässen gleich erhalten, so bildet sich in dem Berührungspunkte eine ebene Wasserscheibe, im anderen Falle, bei ungleichen Wasserhöhen, wird diese Scheibe conoidisch oder ellipsoidisch.

Mechanik, c. 1815 bis c. 1840.

Bei dem Abfluss der Gase durch längere Röhren wollte Baader in München um das Jahr 1805 bemerkt haben, dass der Widerstand der Röhren gegen das Durchströmen ein merkwürdig grosser sei. D'Aubuisson [1]) fand durch sorgfältige Versuche, dass dieser Widerstand dem Quadrat der Geschwindigkeit der Gase proportional und nur wenig langsamer als die Länge der Röhre zunehme. Das Ansaugen von Scheiben durch einen Luftstrom, der aus einer Röhre gegen dieselben geblasen wird, soll durch einen Arbeiter in der Giesserei zu Fourchambaut in Frankreich zuerst bemerkt worden sein; Clément [2]) machte die Beobachtung bekannt und gab die richtige Erklärung.

Alle diese und viele andere ähnliche oder speciellere Versuche liessen das verbreitete Walten der sogenannten Molecularkräfte bestimmt erkennen und zeigten deutlich darauf hin, dass bei allen physikalischen Erscheinungen, wo es sich um Wirkungen in der Nähe handelt, eine etwaige Einwirkung dieser Kräfte wohl zu prüfen und in Rücksicht zu ziehen ist. Die experimentelle Physik konnte auch in vielen Fällen die Wirkungen dieser Molecularkräfte isoliren und dieselben zu einer plausiblen Erklärung der Erscheinungen benutzen. Eine klare Einsicht in das Wesen derselben aber, in ihren Zusammenhang mit dem Begriff der Materie, mit den anderen Elementarkräften derselben, erlangte man nicht. Im Gegentheil, je mehr man sich nach einer Physik der Molecüle sehnen lernte, je genauer man die Wirkungen der sogenannten Molecularkräfte studirte, desto klarer nur zeigten sich die Schwierigkeiten, die den Weg zur Molecularphysik noch versperrten.

Die **Wellenlehre** hatte bis 1825 merkwürdige Schicksale gehabt. Die Wellen des Wassers waren schon vor Aristoteles mit Interesse beobachtet worden und mussten auch später fortdauernd Interesse er-

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

---

[1]) Jean François D'Aubuisson du Voisins (1769 — 1841 Toulouse, Chef-Ingenieur im Corps des Mines): Sur la résistance que l'air éprouve dans les tuyaux de conduite; Ann. de chim. et de phys. XXXIV, p. 383, 1827.

[2]) Ann. de chim. et de phys. XXXV und XXXVI, 1827; Pogg. Ann. X, S. 269, 1827.

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

regen. Zu einer experimentellen Untersuchung und einer darauf gegründeten Theorie derselben war man, von einigen specielleren, wenig beachteten Angaben abgesehen, noch nicht gekommen. Die Wellenbewegung und die stehenden Schwingungen der Luft, der Saiten etc., die wir als Schall empfinden, waren seit Newton ein Lieblingsthema der bedeutendsten Mathematiker gewesen; aber ihre, der mathematischen Deduction zu Grunde gelegten, vereinfachenden Annahmen entsprachen so wenig den complicirten Wirkungen, und die Uebereinstimmung ihrer Resultate mit den thatsächlichen Erscheinungen war eine so geringe, dass der Werth ihrer Arbeiten für die Physik ebenso fraglich als für die Mathematik unzweifelhaft war. Jetzt aber erfuhr die Wellentheorie des Aethers durch Fresnel eine solche erfolgreiche Bearbeitung, dass ihre Sicherheit kaum noch zu wünschen übrig liess. Da war es höchste Zeit, für die wägbare Materie nachzuholen, was für die unwägbare schon gelungen war, und für die Experimentalphysik wurde die Aufgabe dringender, die Wellenbewegung wenigstens so weit zu beobachten, dass das mathematische Genie die nöthige Grundlage für eine weitere Ausbildung der Theorie erhielt. Dies leisteten selbst in genialer und höchst vollendeter Weise die Gebrüder Weber [1]) in ihrem classischen Werke „Wellenlehre auf Experimente gegründet, oder über die Wellen tropfbarer Flüssigkeiten mit Anwendung auf die Schall- und Lichtwellen“ (Leipzig 1825). Wir versuchen der Bedeutung des Werkes durch eine kurze Inhaltsübersicht gerecht zu werden [2]).

Es giebt eine schwingende Bewegung von doppelter Art, eine fortschreitende und eine stehende. Die fortschreitende ist

---

[1]) Wilhelm Eduard Weber wurde am 24. October 1804 in Wittenberg geboren. Seit 1814 besuchte er die Unterrichtsanstalten des Waisenhauses in Halle und dann die Universität daselbst. Während der letzteren Zeit beschäftigte er sich in Gemeinschaft mit seinem älteren Bruder Ernst Heinrich Weber (24. Juni 1795 Wittenberg — 26. Januar 1878 Leipzig, Prof. der Physiologie in Leipzig) mit der „Wellenlehre“, die beide 1825 veröffentlichten. 1828 wurde Wilhelm Weber ausserordentl. Prof. in Halle, 1831 ordentl. Prof. der Physik in Göttingen. 1837 entsetzte man ihn dort mit den bekannten Göttingern seines Amtes. Bis 1843 lebte er in Göttingen als Privatmann in enger wissenschaftlicher Verbindung mit Gauss. Bis 1849 war er Prof. der Physik in Leipzig, von wo er dann in sein früheres Amt nach Göttingen zurückkehrte. Dort lebt er noch, ein Nestor der Wissenschaft, der Letzte der Göttinger Sieben.

Mit einem dritten Bruder, Eduard Friedrich Weber (1806 — 1871, Anatom in Leipzig) gab Wilhelm Weber „Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge“ (Göttingen 1836) heraus.

[2]) Chladni, der mehr die Resultate der Wellenbewegung, als die in ihr stattfindenden Bewegungen im Einzelnen betrachtet hatte, empfahl (Pogg. Ann. V, S. 345, 1825) die „Wellenlehre“ als eine, sowohl in Bezug auf seine Klangfiguren, als auch überhaupt für die Akustik im Allgemeinen vortreffliche und unentbehrliche Arbeit, reich an neuen und merkwürdigen Resultaten und mit richtigen Ansichten angestellten Versuchen. Ich halte mich im Folgenden so viel als möglich an den Wortlaut des Werkes.

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

gleichbedeutend mit der Wellenbewegung. Die Wellenbewegung gehört zu den am häufigsten in der Natur vorkommenden Erscheinungen; stehende Oscillationen sind bis jetzt nur an tönenden Körpern beobachtet. Zwei Wege stehende Schwingungen zu erregen giebt es: Entweder bringt man alle Theile der Körper in eine solche Lage, dass sie dieselbe alle zu gleicher Zeit und mit gleicher Kraft zu verlassen streben, das war bis jetzt der Weg der Mathematiker, ist aber selten der Weg der Natur; oder man lässt mehrere gleich breite Wellen, deren Breite[1]) einem aliquoten Theile der schwingenden Linie oder Fläche gleichkommt, in entgegengesetzter Richtung und mit gleicher Kraft einander begegnen. (Auf diesen letzteren Weg machen wir besonders aufmerksam.)

Franklin hat zuerst eine plausible Erklärung für die Entstehung der Wasserwellen durch den Wind gegeben. Nach ihm haftet die Luft am Wasser, und der Wind, der über das Wasser weht, schiebt darum dasselbe vor sich her. Weil aber dabei die oberen Wassertheilchen die unteren mit bewegen, so wird die Bewegung von Luft und Wasser so lange langsamer, bis der Druck der nachfolgenden Lufttheilchen die ersten vom Wasser losreisst. Danach vermindert sich allmählich die Spannung und das Spiel beginnt von Neuem. Nach Weber werden durch diese Reibung des Wassers an der Luft nur die allerkleinsten Wellen, welche stets die Oberfläche grosser Wellen bedecken, erzeugt. Stärkere Wellen entstehen in unendlicher Anzahl nur durch den Stoss oder den Druck des Windes auf das Wasser. Die fortgesetzte Vergrösserung dieser Wellen hängt dann von vier Ursachen ab: 1) von der fortgesetzten Wirkung des Windes auf diejenigen Wellenstücke, die in seiner Richtung fortgehen; 2) von der Vereinigung mehrerer Wellen, die in derselben Richtung fortschreiten, zu einer einzigen; 3) von dem Drucke, welchen jede Welle auf die vorhergehende und nächstfolgende ausübt; 4) endlich von der Durchkreuzung der Wellen, die in entgegengesetzter Richtung gehen. Wie später gezeigt werden wird, sind in der vorderen Hälfte einer Welle alle Theilchen im Steigen, in der hinteren aber alle im Niedersinken begriffen. Der Wind, dem die hintere Hälfte zugewendet ist, drückt die Theilchen derselben schneller nieder, während er das Steigen der vorderen Hälfte, über die er in einem spitzen Winkel geht, wenig hindert. Bei den Wellen, die dem Winde entgegenkommen, ist es gerade umgekehrt, die Wellen werden sich deshalb vor Allem mit dem Winde bewegen und in dieser Richtung summiren. Jede Welle erregt, während sie fortschreitet, an dem Orte, den sie verlässt, eine neue Welle; diese neu entstandene erzeugt, wenn auch sie, um so viel wie ihre Breite beträgt, fortgerückt ist, wieder eine Welle hinter sich,

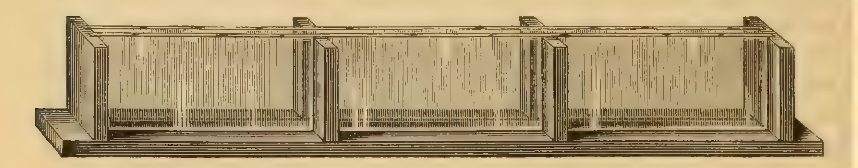
[1]) Breite nennen die Gebrüder Weber die Dimension der Wellen, welche wir jetzt mit Wellenlänge bezeichnen; Länge ist ihnen dagegen die Ausdehnung der Welle senkrecht zur Breite.

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

so dass auf diese Weise hinter jener ersten Welle 30 bis 40 neue Wellen nachgebildet werden können, die alle in der Richtung wie die erste Welle fortschreiten. Diese Rückwirkung der Welle auf die nachfolgende, von der die Vergrösserung der Wellen mit abhängt, erklärt auch die grosse Regelmässigkeit in der Aufeinanderfolge der Wellen trotz der unregelmässigen Windstösse.

Auf dem Meere bemerkt man oft mehrere linienförmige Wellenzüge, die sich unter verschiedenen Winkeln schneiden. Wo diese Wellenzüge sich kreuzen, bilden sie natürlich höhere Wellen, die sich beim Fortschreiten der Wellen immer wieder auflösen und neu erzeugen; daher scheint es, als ob diese Wellen überhaupt nicht fortschritten, sondern nur emporstiegen und niedersänken. Sonst aber scheinen die grossen Wellen, die, wie gezeigt wird, schneller fortschreiten als die kleinen, unter der Oberfläche der kleinen sich fortzuwälzen. Von den sich kreuzenden Wellen rührt auch das zackige Aussehen derselblen her. Grosse Wellen können nur entstehen, wenn die horizontale Ausdehnung der Wasserfläche sehr gross und ihre Tiefe sehr beträchtlich ist. Die Erhebung über die Oberfläche ist nur die Wirkung einer weit in die Tiefe reichenden, inneren Bewegung der Flüssigkeit. Hat sich eine Welle einmal in der Tiefe entwickelt, so nimmt sie beim Auftreffen auf seichte Stellen viel an Höhe zu, beginnt aber vorn steiler zu werden und brandet. Aus dieser Theorie erklärt sich auch die Besänftigung der Wellen durch Aufgiessen von Oel, die so vielfach beobachtet worden ist. Das Oel, welches sich auf Wasseroberflächen schnell ausbreitet, hindert die Bildung der ersten Wellen, wie die Verstärkung und Erhaltung der schon vorhandenen.

Zur experimentellen Bestimmung der Form der Wellen tropfbarer Flüssigkeiten und der dabei stattfindenden Bewegung der Theilchen im Einzelnen benutzten die Gebrüder Weber eine von ihnen construirte Wellenrinne, wie sie nachstehend abgebildet ist. Um die Form der Wellenoberfläche zu beobachten, bestäubt man, wenn



man Oel in der Rinne hat, eine rechtwinkelig geschnittene Schiefertafel mit Mehl, oder benutzt bei Wasser oder Branntwein eine matt geschliffene Glastafel. Setzt man dieselbe senkrecht und parallel zu den Wänden in die Wellenrinne, so bildet sich auf der Tafel das Niveau ab, das man durch einen Strich bezeichnet. Lässt man nun an dem Ende der Rinne einen Tropfen in dieselbe fallen, und zieht, wenn der erste Wellenberg bis zur Hälfte der Tafel fortgeschritten, die Tafel schneller heraus

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

als die Welle fortschreitet, so bildet sich der vordere Abhang des Wellenberges vollkommen ab. Der hintere Theil ist nicht so genau zu erhalten, man muss, um denselben abzubilden, die Tafel möglichst schnell in die Rinne tauchen und momentan wieder herausziehen. Die Wellen sind im Verhältniss zu ihrer Breite ungemein flach [1]). Um die Bahnen der in einer Welle schwingenden Theilchen zu beobachten, füllten die Gebrüder Weber die Wellenrinne mit Wasser aus der Saale bei Halle, in welchem suspendirte, feste Körperchen die Bewegung sichtbar machten. Sie sahen durch die Rinne nach dem Fenster theils mit blossem Auge, theils mit einem angeschraubten, einfachen Mikroskop von $3^1/_2'''$ Brennweite. Mit Hülfe eines sehr kleinen Federzirkels, dessen Schenkelspitzen zwischen die Glasrinne und das Mikroskop gebracht wurden, liessen sich die Dimensionen der Bahnen genau bestimmen.

Die Schwingungsbahnen der Flüssigkeitstheilchen laufen, wenn die aufeinander folgenden, unter einander verbundenen Wellenberge und Wellenthäler gleich oder fast gleich gestaltet sind, in sich selbst oder fast in sich selbst zurück und sind anscheinend Ellipsen, die in der Verticalebene liegen. Sie laufen dagegen nicht in sich selbst zurück, wenn die Berge und Thäler von ungleicher Grösse sind. An der Oberfläche sind im ersten Falle die Ellipsen kreisähnlich, mit der Tiefe werden sie immer flacher und fallen endlich in horizontale, gerade Linien zusammen. Dabei nehmen alle Dimensionen fortwährend ab; an dem stärkeren Abnehmen der senkrechten Dimensionen scheint der Boden schuld zu sein. An der Oberfläche ist der senkrechte Durchmesser der Bahn eines Theilchens der Höhe der Welle gleich, der horizontale Durchmesser hat kein bestimmtes Verhältniss zur Breite der Welle. Die horizontal in der Richtung einer Welle liegenden Theilchen kommen nach und nach in Bewegung, so dass nicht mehrere derselben, die zu einer Welle gehören, gleichzeitig sich in homologen Punkten ihrer Schwingungsbahn befinden [2]); dagegen scheinen die senkrecht unter einander liegenden Theilchen ganz gleichzeitig in die entsprechenden Punkte ihrer Bahn einzutreten.

Während ein Theilchen der Flüssigkeit einmal seine Bahn durchläuft, schreitet die Welle, in der sich das Theilchen jetzt befindet, um so viel fort, als die Breite desselben beträgt, und

[1]) Gerstner (Theorie der Wellen, Prag 1804) hat bewiesen, dass die Krümmung der Welle eine gemeine oder eine geschleifte Cycloide ist; das ist im Allgemeinen richtig, unter besonderen Umständen aber kann der vordere Theil der Welle auch eine ganz andere Gestalt haben als der hintere.

[2]) Newton, wie s'Gravesande, wie d'Alembert meinten, ein ins Wasser fallender Körper treibe an seiner Seite einen Wellenberg in die Höhe, der darauf in allen seinen Theilen gleichzeitig sinke und so zu einem Thal werde.

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

daher durchläuft auch ein Theilchen in einer gewissen Zeit eben so vielmal seine Bahn, als Wellen durch den Raum gehen, wo sich das Theilchen bewegt.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen hängt keineswegs, wie Newton, s'Gravesande, d'Alembert und neuerdings Gerstner behauptet haben, von der Breite derselben allein, sondern von ihrer Grösse, d. h. von ihrer Höhe und Breite zugleich ab. Nur die Länge der Wellen hat unmittelbar keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit; aber wenn eine Welle während ihres Fortschreitens an Länge zunimmt, so vermindert sich zugleich ihre Geschwindigkeit und Höhe, und umgekehrt. Wellen, die ganz allein sich selbst überlassen sind, verändern Länge, Breite und Höhe, und zwar vergrössert sich Länge und Breite auf Kosten der Höhe, und umgekehrt. Bei Wellen elastischer Flüssigkeiten fallen Höhe und Breite in eine Dimension, die Dicke, zusammen. Da sich nun die Breite nur auf Kosten der Höhe vergrössern kann, so ist klar, dass alle Wellen elastischer Flüssigkeiten an Breite nicht veränderlich sein können, ausser wenn sie in ein anderes Medium treten, wie auch von allen Physikern anerkannt ist. Darum hängt auch die Geschwindigkeit dieser Wellen nicht von ihrer Grösse, sondern nur von der elastischen Kraft ihres Mittels ab, während die Wellen unelastischer Flüssigkeiten von der Dichte der Flüssigkeit, in der sie sich bewegen, unabhängig sind. Alles das hat seinen Grund darin, dass die ersteren Wellen nach drei Dimensionen, die letzteren nur nach zwei Dimensionen fortschreiten.

Bei der Durchkreuzung von Wellen vereinigen sich die Berge und Thäler zu höheren Bergen und tieferen Thälern, die sich aber direct wieder nach der Durchkreuzung in die alten Berge und Thäler spalten, die auch ihre alte Richtung fortsetzen. Bei der Durchkreuzung entsteht ein kleiner Zeitverlust, nach derselben tritt die alte Geschwindigkeit wieder ein.

Wird durch Fallenlassen einer Flüssigkeitssäule an dem einen Ende der Wellenrinne eine Welle erregt, so geht die Welle bis an das andere Ende und wird hier zurückgeworfen, so dass wieder der Wellenberg dem Thal vorhergeht, dass also nun beide zur Wand die umgekehrte Lage wie früher haben. Bei der Reflexion wird also die Lage jeder Welle umgekehrt, ungeachtet die Zurückwerfung der Wellen keineswegs eine Erscheinung der Elasticität der Flüssigkeiten, sondern nur ihrer Schwere ist. Stellt man sich ein elliptisches Gefäss her, füllt es mit Quecksilber und lässt in den einen Brennpunkt immerwährend Quecksilbertropfen fallen, so bilden sich unaufhörlich Wellen, die in den anderen Brennpunkt zurückgeworfen werden, und auf der Flüssigkeit zeigen sich mit einmal die Wellen in allen den Stadien, die sonst eine Welle nur allmählich durchläuft. Bei der Reflexion von Wellen, die durch einen mit einer Oeffnung versehenen Widerstand

zum Theil zurückgeworfen werden, zum Theil freien Fortgang haben, zeigt Weber, dass auch hier, wie beim Lichte durch die Interferenz, hyperbolische Durchschnittslinien gebildet werden, die den Interferenzstreifen im gebeugten Lichte entsprechen.

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

Da die stehende Schwingung nichts ist als eine ununterbrochene, sich wiederholende, regelmässige Durchkreuzung von Wellen, so kann man sie am leichtesten dadurch hervorrufen, dass man in regelmässigen Zeitabschnitten gleich breite Wellen erregt, und diese Wellen von den regelmässigen Wänden eines Gefässes so zurückwerfen lässt, dass sich die Wellenberge und Thäler an symmetrisch geordneten Stellen zweifach oder mehrfach durchkreuzen, und dass die höchsten und tiefsten Punkte aller dieser Durchkreuzungen gleich weit von einander abstehen. Die Theilchen beschreiben in diesen Wellen nicht Curven, die in sich selbst zurücklaufen, sondern die Theilchen gehen durch dieselben Bahnen wieder rückwärts, durch die sie vorwärts gegangen waren. Stehende Wellen bilden sich fast immer, wenn auch unregelmässig da, wo ein Gefäss fortdauernd erschüttert wird.

Nach dieser ganz originellen und erschöpfenden Betrachtung der Wellen tropfbarer Flüssigkeiten wenden sich die Gebrüder Weber zur Betrachtung der Wellen in Beziehung auf Schall und Licht, der aber die beiden Eigenschaften der Originalität, wie der Vollendung in geringerem Grade zukommen, was ja in der Natur der Sache begründet ist. Chladni hatte in tönenden Körpern dreierlei Arten von Schwingungen unterschieden, transversale, longitudinale und Torsionsschwingungen. Diese Unterscheidung versuchte Savart als nichtig nachzuweisen. Savart hatte noch vor 1819 [1]), um zu einer Theorie der Saiten- und Bogeninstrumente zu kommen, die Erscheinungen der Resonanz genauer untersucht. Seine Bemerkungen über die Bedeutung der Resonanzkasten, den Stimmstock, den Steg, den Hals dieser Instrumente sind auch von hohem theoretischen Interesse geworden. Die nach seinen Principien construirte, sargähnliche Geige aber, die von einer Commission der Pariser Akademie nicht ungünstig beurtheilt wurde, hat trotzdem die Geigenbauer nicht veranlasst von der Nachahmung der alten italienischen Meister abzugehen und nach Savart's theoretischen Principien ihre Instrumente zu vollenden. Die durch die Bemühungen um die Theorie des Instrumentenbaues veranlassten Untersuchungen der Resonanz fester Körper führten zu neuen wichtigen Resultaten, die letzten daraus gezogenen Schlüsse haben aber ebenfalls nicht die volle Anerkennung gefunden. Um den Einfluss des Stimmstockes der Violine festzustellen, befestigte Savart an beiden Enden eines langen Brettes senkrecht zu dessen Richtung zwei andere kleinere. Wenn er dann die obere, horizontal gehaltene Platte

[1]) Mém. relatif à la construction des instruments à cordes et à archet, Ann. de chim. et de phys. XII, 1819.

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

mit einem Bogen anstrich, so gab die untere dieselben Klangfiguren wie die obere; die Schwingungen der einen kurzen Platte wurden also unverändert durch das lange Brett zu der anderen Platte geleitet. Gleich darauf complicirte Savart noch diesen Versuch [1]). Er verband auf mannichfaltige Weise längere und kürzere Platten aus Glas und Holz so mit einander, dass die verbundenen immer senkrecht zu einander standen. Wenn er dann eine beliebige dieser Platten durch Anstreichen mit einem Bogen in Transversalschwingungen versetzte, so wurde dadurch allemal die senkrecht dazu gerichtete, in directer Verbindung mit ihr stehende Platte in Longitudinalschwingungen versetzt, und diese Schwingungen übertrugen sich auf alle Platten ohne Veränderung der Richtung und sogar ohne Veränderung ihrer Geschwindigkeit. Nachdem vielfach abgeänderte Versuche immer wieder ähnliche Resultate gebracht, meinte dann Savart das allgemeine Gesetz aussprechen zu dürfen, dass die Vibrationen von einem Körper zum andern immer in der Weise mitgetheilt werden, dass sie ihrer ursprünglichen Richtung parallel bleiben, und dass danach alle Vibrationen, die transversalen, longitudinalen und rotatorischen, nur als blosse Umstände einer allgemeinen und allen Körpern gemeinsamen Bewegungsart zu bestimmen seien, die durch Moleculaoscillationen erzeugt, welche nach der Richtung der einwirkenden Kräfte modificirt werden. Die Gebrüder Weber gaben zu, dass durch Resonanz in den Körpern Schwingungen nach allen möglichen Richtungen erzeugt werden könnten, machten aber darauf aufmerksam, dass in selbständig und frei tönenden Körpern als Schwingungsarten doch nur jene drei von Chladni charakterisirten vorkommen [2]). Sie hielten es vielmehr für angezeigt (auch bei stehenden Schwingungen die ursprüngliche Fortpflanzungsrichtung der Wellen beachtend) zweierlei Vibrationen zu unterscheiden. Nämlich primäre, bei denen die Schwingungen (durch Verdickung und Verdünnung des Körpers geschehend) der Fortpflanzungsrichtung der Wellen gleichgerichtet sind, und secundäre, bei denen die Schwingungen (durch seitliche Ausbiegungen hervorgerufen) senkrecht zu dieser Richtung geschehen [3]).

Die secundären Schwingungen gespannter Seile hat

---

[1]) Mém. sur la communication des mouv. vibratoires entre des corps solides, Ann. de chim. et de phys. XIV, 1820; Gilbert's Ann. LXVIII, S. 113, 1821.

[2]) Wellenlehre, II. Hauptheil; I. Abth., Abschnitt V. Auch Poisson (Sur les vibrations des corps sonores, Ann. de chim. et de phys. XXXVI, 1827) hat für die tönenden Körper die drei Chladni'schen Arten von Schwingungen beibehalten und nur eine vierte Art zugefügt. Dies sind die Normalschwingungen, welche senkrecht gegen die Länge des tönenden Körpers, nicht durch Aus- und Einbiegungen, sondern durch Compressionen und Dilatationen geschehen.

[3]) Wellenlehre, II. Hauptheil, I. Abth., Abschnitt I.

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

Euler[1]) vollständig und erfolgreich bearbeitet. Sie gleichen noch am meisten den Wasserwellen. Jeder stehenden Schwingungsbewegung geht dabei eine fortschreitende voraus, die erst nach und nach sich in ein gewisses Gleichgewicht setzt; dieses Gleichgewicht wird aber niemals vollkommen sein, so dass immer eine gewisse Wellenbewegung mit der stehenden Schwingung verbunden bleibt. Die bekannte Thatsache, dass der Klang einer Saite bedingt ist durch die Stelle, an welcher dieselbe angerissen wird, ist wohl in der dabei stattfindenden Verschiedenheit der Gestalt der schwingenden Saite und in den gleichzeitig bleibenden, fortschreitenden Schwingungen begründet. Der Vorgang, wenn Metallstäbe, Glasstäbe, Glasröhren etc. in eine secundäre Schwingung gebracht werden, ist dem bei Saiten ganz ähnlich; auch hier entstehen ohne Zweifel Wellen, die, indem sie sich regelmässig begegnen, eine stehende Schwingung hervorbringen. Aber die Geschwindigkeit, mit der die Wellen hier fortschreiten, ist eine ganz andere, viel grössere als bei der Saite. Bei Betrachtung der fortschreitenden, primären Schwingungen der Luft kommen die Gebrüder Weber auf die auffallende Erscheinung, dass eine fortschreitende Welle die Luft hinter sich ruhig zurücklassen kann, dass man einen Knall z. B. an einer Stelle der Luft nur einen kurzen Moment hindurch hört, keineswegs aber noch dann, wenn die Schallwellen zu anderen Luftschichten übergegangen sind. Denkt man sich zur Erklärung in einer Röhre zwei Lufttheilchen in der Mitte z. B. von grösserer Dichtigkeit als die anderen, so wird sich diese Verdichtung nach beiden Seiten hin ausgleichen. Denkt man sich aber die Theilchen alle gleich dicht, dagegen die beiden Lufttheilchen in der Mitte mit den gleichen Geschwindigkeiten nach dem vorderen Ende der Röhre hin bewegt, so wird nach vorn eine Verdichtung, nach hinten eine Verdünnung fortschreiten. Wirken nun, wie das bei einer Lufterschütterung nach einer Seite hin der Fall ist, beide Umstände zusammen, so wird nach vorn die doppelte Verdichtung fortschreiten, nach hinten aber wird sich die Verdichtung und die Verdünnung ausgleichen und also Ruhe eintreten.

Die tönende Luft in einer Orgelpfeife, in jedem anderen Blasinstrumente und in dem menschlichen Stimmwerkzeuge befindet sich in einer stehenden primären Schwingung. Der Vorgang, durch welchen dieselbe in stehende Schwingungen geräth, ist derselbe wie beim Wasser und den secundären Schwingungen der Saiten. In einer Orgelpfeife werden nämlich die Schwingungen der Luft nicht bloss reflectirt, wenn die Pfeife oben verschlossen ist, sondern auch, wenn sie offen ist, nur behält die Welle im ersten Falle ihren Charakter, während sie im zweiten Falle sich umkehrt und aus einer verdichtenden Welle eine verdünnende und umgekehrt wird. Bei Flötenwerken strömt die Luft nicht gleichmässig durch die Spalte, sondern verdichtet und verdünnt

[1]) Act. Petrop. 1779, erschienen 1783.

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

sich abwechselnd und geräth also in Schwingungen. Die abwechselnden Stösse, welche die Luft giebt, wenn sie schnell durch eine Oeffnung strömt, beobachtet man recht deutlich bei einem Windofen, wo die Luft, wenn die Oeffnung an der Ofenspalte gehörig verengert wird, regelmässig in die Oeffnung hineingestossen und angehalten wird und so pulsirt. Die Gebrüder Weber vermuthen, dass ein ähnlicher Vorgang die Ursache des Tönens ist in Röhren, in denen Wasserstoffgas angezündet wird.

Bei Zungenpfeifen ist nicht, wie Gottfried Weber[1]) behauptet, die Zunge der tönende Körper, sondern nur das mechanische Mittel, welches die Oeffnung abwechselnd öffnet und schliesst. Jedenfalls ist so viel klar, dass die Bewegungen der Zunge mehr von der Bewegung der in einer langen Pfeife hin und her laufenden Luftwellen, als von ihrer eigenen Elasticität abhängen, dass sie also eigentlich mehr geschwungen wird, als sich selber schwingt. Doch ist die Theorie der Blasinstrumente noch immer der Verbesserung sehr bedürftig, und vor Allem hat die mathematische Behandlung hier wenig Erfolg gehabt. Lagrange gestand unumwunden ein, dass seine Formeln nur sehr unvollkommen den Grund der beobachteten Erscheinungen über die Weite der Blasinstrumente und die Stellung ihrer Löcher angeben. Poisson's Arbeiten[2]) aber lehren, dass man nicht einmal den tiefsten Grundton einer Röhre a priori finden kann.

Bei der Betrachtung der Wellen in Beziehung auf Licht, dem letzten Abschnitt des Werkes, widerlegten die Gebrüder Weber die Einwände Newton's gegen die Undulationstheorie, wie auch die von Biot und Malus. „Was die Newton'sche Lehre vom Lichte anlangt," sagen sie S. 574, „so muss man sie mit allen Physikern, namentlich mit Biot . . ., für ein Meisterstück der Abstraction aus der Erfahrung halten, die Emanationstheorie dagegen nur für ein erdichtetes Hülfsmittel, die abstrahirten optischen Gesetze anschaulich zu machen, ohne den geringsten Anspruch darauf zu machen, dass diese anschauliche Erläuterung irgend dem wirklichen Lichtwesen entspräche. So betrachtet, wird die Emanationstheorie ihren Nutzen haben, ob sie gleich, da sie für die Lehre von der Inflexion und Interferenz nicht passt, ihrem Zweck nicht ganz vollkommen entspricht. Verlangt man aber eine Hypothese für das Wesen des Lichtes, durch welche die Lehre von dem Lichte in Einklang mit den von uns schon anderweit erkannten Naturkräften und Gesetzen kommen sollte, und hält man das Beginnen, eine solche Hypothese zu suchen, überhaupt nicht für zu voreilig, so verdient die Wellentheorie des Lichtes bei Weitem den Vorzug vor der Emanationstheorie[3])."

---

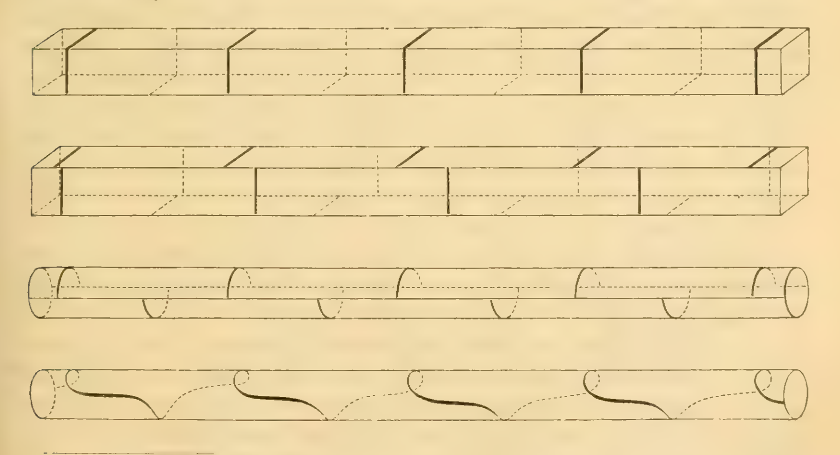
[1]) Versuch einer geordneten Theorie der Tonkunst, Mainz 1824.

[2]) Sur la théorie des instruments à vent; Mém. de l'acad. X, 1819; erschienen 1824, p. 19.

[3]) Für den damaligen Stand der Optik ist charakteristisch die vorsichtige Milde des Ausdrucks bei aller Festigkeit der Ueberzeugung, so wie auch der

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

Das Werk der Gebrüder Weber berührt höchst angenehm, nicht bloss durch die in ihm dargelegten geschickten experimentellen Untersuchungen, sondern auch durch die klaren Einsichten in das Wesen der Vorgänge, wie durch die Anschaulichkeit der Darstellung. Im ersteren Punkte sind die Arbeiten Savart's ebenbürtig, nicht ganz so in den letzteren. Savart's[1]) neue Einsichten in die durch Resonanz hervorgerufenen Schwingungsarten der Körper reizten ihn noch später zu weiteren Untersuchungen der Bewegungen tönender Körper an, bei denen er immer zum Hervorrufen der Schwingungen in den betreffenden Körpern die Resonanz benutzte. Die schon 1820 begonnenen und 1824 fortgesetzten Versuche über die Knotenlinien in festen Körpern vollendete er im Jahre 1837[2]). Bestreut man die Flächen eines longitudinal schwingenden Stabes mit trocknem und feinem Sand, so wird auf ihm eine gewisse Anzahl von Knotenlinien sichtbar, die senkrecht zur Längenausdehnung des Stabes und in eigenthümlicher Weise so gelagert sind, dass diejenigen, welche auf der einen Seite des Stabes liegen, immer ungefähr die Mitte des Zwischenraumes derjenigen Knotenlinien treffen, die auf der anderen Seite liegen. Die Anzahl dieser Knotenlinien ist um so grösser, je grösser bei sonst gleichen Verhältnissen die Dicke des Stabes ist. Ist der Stab vierkantig oder cylindrisch geformt, so können die Knotenlinien der entgegengesetzten Seiten sich zu Schraubenlinien vereinigen, wie das die folgenden Figuren zeigen. Da die Abhängigkeit der Knotenlinien von den Dimensionen des Stabes ganz



Umstand, dass für die Undulationstheorie nur Reflexion und Interferenz, aber noch nicht Doppelbrechung und Polarisation aufgeführt werden.

[1]) Felix Savart (30. Juni 1791 Mézières — 16. März 1841 Paris), 1816 Arzt in Strassburg, dann (1820) Prof. der Physik an einer Privatanstalt in Paris, zuletzt Conservator des physikalischen Cabinets im Collège de France.

[2]) Ann. de chim. et de phys. XIV, XXV, LXV, p. 337; Gilbert's Ann. LXVIII, S. 115, 1821; Pogg. Ann. XIII, S. 402 u. LI, S. 555, 1840.

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

der der Transversalschwingungen entspricht, so schloss Savart, dass jene Linien durch Transversalschwingungen erzeugt würden, die die Longitudinalschwingungen begleiteten, und erklärte diese Erscheinungen folgendermaassen. Wenn der Stab bei der Longitudinalschwingung sich in seiner Längenrichtung zusammenzieht, so werden Biegungen wie bei Transversalschwingungen erzeugt, aber diese können nicht in die entgegengesetzte Biegung übergehen, weil nunmehr der Stab sich ausdehnt und die Biegung aufgehoben wird. Es wird also die Biegung nur als Halbschwingung geschehen. Die Entfernung der Knotenlinien ist auch bei demselben Versuche nicht überall die gleiche; es rührt das von Ungleichheiten in der inneren Structur der Körper her. Wenn ein gleichartiger Stab, dessen Knotenlinien rechtwinkelig gegen die Kanten des Stabes sind, nur wenig gebogen und hierauf mehr oder weniger vollkommen ausgestreckt wird, so reicht das hin, die Knotenlinien zu verändern, dasselbe geschieht, wenn man nur den Stab in der Mitte mit den Fingern drückt.

Bewundernswerth ist die grosse Kraft, welche von den longitudinalen Schwingungen entwickelt wird, wenn man sie mit der Leichtigkeit vergleicht, mit welcher die Schwingungen hervorgebracht werden. Man braucht nur ein Glasrohr von 2 bis 3 m Länge und einigen Millimetern Durchmesser mit nassen Fingern gelinde zu überfahren, so zieht das Rohr eine in dasselbe gelegte Bleikugel selbst der Schwere entgegen mit Heftigkeit in sich. Eine Pendelkugel wird von dem Ende des Stabes mit grosser Gewalt hinweggeschleudert. Um aber einem cylindrischen Glasstab von 0,968 m Länge und 29,10 mm Durchmesser eine gleiche Verlängerung, wie er sie durch die longitudinalen Schwingungen erhält, zu ertheilen, wären nicht weniger als 900 kg erforderlich; der Glasstab verlängert sich nämlich um 0,210 mm. Darum zersprangen auch, wenn die Schwingungen eine gewisse Grösse erreichten, Röhren und Stäbe von 2 bis 3 m Länge mit Leichtigkeit.

Zur Untersuchung des Bewegungszustandes der Luft in tönenden Pfeifen bediente sich Savart eines dünnen, mit Sand bestreuten Häutchens, das über einen Ring gespannt und an einem feinen Faden wie eine Wagschale aufgehängt wurde. Verfeinert aber wurde der Apparat und zu genaueren Versuchen benutzt durch Hopkins [1]). Dessen Apparat bestand aus einer Glasröhre, in welche oben zum Verkürzen und Verlängern eine genau anschliessende Messingröhre geschoben wurde. Innerhalb der Röhre war ein kleiner messingener, mit einer dünnen Haut überspannter Rahmen so angebracht, dass er tief und hoch gestellt werden konnte. Diese Haut liess sich durch stärkeres oder schwächeres Spannen auf den Ton der Röhre abstimmen, so dass sie leicht resonirte. Damit bestätigte Hopkins im Allgemeinen die früheren

---

[1]) Phil. Trans. Cambr. Soc. V, p. 234. Pogg. Ann. XLIV, S. 246 und 603, 1838.

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

Angaben über die Grund- und Obertöne offener und gedeckter Pfeifen, fand aber auch, dass die Bewegung in den Knotenpunkten, weil die Reflexion der Wellen nicht vollständig erfolgt, nicht gleich Null, sondern nur eine minimale ist, dass die Entfernung des ersten Knotens vom unteren, offenen Ende einer gedeckten Pfeife nicht gleich, sondern merklich grösser und dass die Entfernung des ersten Knotens vom oberen Ende einer offenen Pfeife merklich kleiner ist, als ein Viertel der Wellenlänge. Die älteren, mathematischen Akustiker hatten bei ihren Untersuchungen auf die Uebertragung der Bewegung aus der Röhre auf die diese abschliessenden Substanzen keine Rücksicht genommen und darum Knoten oder Bäuche direct in die Enden der Röhre gesetzt. Das war ein Grund für die nicht genaue Uebereinstimmung ihrer Resultate mit der Erfahrung und das war auch die Ursache dafür, dass sie das plötzliche Erlöschen des Tones der Röhre mit dem Aufhören der äusseren Erregung desselben aus ihren Formeln nicht ableiten konnten. Hopkins erklärt auch dieses durch die Schwächung des Tones bei der Reflexion, die schon bei einer 5- bis 6 maligen Reflexion die Intensität bis zu einer unmerklichen Grösse verringert.

Hopkins benutzte zur Erregung der Luftschwingungen in Pfeifen ähnlich wie Savart nicht das Anblasen derselben, weil der beständige Luftstrom dabei die Beobachtungen mittelst der Membranen störte, sondern statt dessen eine Glasplatte, welche er unter der Pfeife anbrachte und mit einem Geigenbogen anstrich. Dabei zeigten sich, wenn die Röhrenöffnung verschiedenartig schwingende Theile der Platte deckte, unleugbare Interferenzerscheinungen des Schalles. Young hatte, wie erwähnt, die Stösse, welche beim Zusammenklingen von Tönen beobachtet werden, als Interferenzerscheinungen charakterisirt. W. Weber hatte im Jahre 1826 [1]) die nach verschiedenen Richtungen hin ungleiche Intensität der von einer Stimmgabel oder auch einem tönenden Stabe ausgehenden Töne durch Interferenz der von zwei entgegengesetzten Seiten dieses Stabes erregten Wellen erklärt. Eine vollkommene Vernichtung der Schwingungen, ein directes Auslöschen eines Tones durch einen anderen, erzeugte Hopkins, indem er die bekannte ⋏ förmige Röhre construirte, die beiden Enden derselben über entgegengesetzt schwingende Theile einer tönenden Platte hielt und darauf aufmerksam machte, dass dann die Membran, welche das obere Ende der Röhre verschloss, in Ruhe bleibt. Kurz vorher hatte übrigens auch Rob. Kane [2]) denselben Zweck erreicht, indem er den Ton durch ⌓ förmige Röhren hindurch sandte, deren gegabelte Zweige um $^1/_2$ Wellenlänge verschieden waren.

Die Fortpflanzung von Tönen in Flüssigkeiten, d. h. von (primären) Schwingungen, die auf Verdichtungen und Verdünnungen beruhen,

---

[1]) Schweigger's Journ. der Physik XLVIII, S. 385 bis 430, 1826.
[2]) Phil. Magazine (3) VII, p. 301. Pogg. Ann. XXXVII, S. 435, 1836.

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

war lange geleugnet worden, und diese Leugnung hatte in der scheinbaren Incompressibilität der Flüssigkeiten ihren guten Grund. Darum wollte man auch, als man durch menschliche oder thierische Gehörwerkzeuge eine Leitung der Töne durch Wasser bemerkte, die Möglichkeit derselben nur aus der Elasticität der im Wasser eingeschlossenen Luft ableiten. Nollet [1]) hatte zwar auch mit Wasser, welches von Luft gänzlich befreit war, gelungene Versuche über die Fortpflanzung des Schalles gemacht, und Franklin [2]) behauptete nach directen Beobachtungen, dass der Schall im Wasser sich weit schneller fortpflanze, als in der Luft; aber diese Thatsachen widersprachen doch unleugbar den bisherigen Erfahrungen über die Compressibilität und Elasticität des Wassers. Erst nachdem diese constatirt waren, konnte man auch freier über die Leitungsfähigkeit des Wassers für den Schall urtheilen. Savart [3]) constatirte im Jahre 1826, dass die Art der Leitung in Flüssigkeiten dieselbe sei wie in festen Körpern, indem er Scheiben auf Wasser schwimmen liess, die er mit Sand bestreut hatte. Die Bewegung des Sandes zeigte dann, dass die Vibrationen eines tönenden Körpers durch Wasser den Scheiben sowohl von unten nach oben, als auch in horizontaler Richtung, also nach jeder Richtung hin durch primäre Schwingungen mitgetheilt werden. Eine genaue Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles im Wasser lieferten im nächsten Jahre Colladon und Sturm [4]). Diese hingen an einer Station eine Glocke unter Wasser auf, die mit einem Hammer angeschlagen wurde; an einer anderen Station beobachtete man den Ton durch eine oben offene, unten erweiterte, durch eine elastische Platte geschlossene Röhre von Eisenblech, die mit dem unteren Ende in das Wasser getaucht, mit dem anderen an das Ohr gehalten wurde. Ohne diese Röhre wurden die Töne, so lange sich das Ohr ausserhalb des Wassers befand, an der zweiten Station nicht gehört. Die Versuche wurden auf dem Genfer See zwischen Thonon und Rolle angestellt, wo der See eine Breite von 14 000 m und eine Tiefe von 140 m und ziemlich ebenen Boden hat. Die Temperaturen an den beiden Stationen betrugen resp. 7,9° und 8,2°; die Entfernung derselben 13 487 m. Die Fortpflanzungszeit ward bei 40 Versuchen zu 9,25 bis 9,5 Secunden bestimmt, die Schallgeschwindigkeit also auf 1435 m in einer Secunde. Die Berechnung dieser Geschwindigkeit aus der beobach-

[1]) Gilbert's Ann. XLIV, S. 346, 1813.

[2]) Letters by Dr. Franklin, Nro. XLIV vom 20. Juli 1762.

[3]) Sur la communication des mouv. vibr. par les liquides, Ann. de chim. et de phys. XXXI, 1826.

[4]) Ann. de chim. et de phys. XXXVI, p. 236, 1827. Die Abhandlung ist ein Theil der preisgekrönten Arbeit über die Compression der Flüssigkeiten. Jean Daniel Colladon, Professor der Mechanik an der Akademie in Genf. Jacob Carl Franz Sturm (1803 — 1855), erst Hauslehrer in Genf, dann (1830) Professor der Mathematik in Paris und nach Poisson's Tode Professor der Mechanik an der Faculté des sciences.

teten Zusammendrückbarkeit des Wassers ergab, ohne Berücksichtigung einer Laplace'schen Wärmeconstante, 1428 m, wonach diese Constante für Flüssigkeiten als von der Einheit kaum abweichend anzunehmen wäre.

Nachdem die Leitungsfähigkeit der Flüssigkeiten für Töne constatirt war, versuchte man auch die Flüssigkeiten selbst in tönende Schwingungen zu versetzen. Cagniard-Latour[1]) blies Pfeifen mit Hülfe eines Kautschukbeutels unter Wasser an, oder brachte die Sirene durch Wasserstrahlen zum Tönen, oder rieb mit Wasser gefüllte Glasröhren (unten geschlossen oder heberförmig gebogen) mit einem nassen Tuche. Eine 1 m lange, unten geschlossene Röhre gab auf diese Weise 385 Schwingungen, eine ebenso behandelte, heberförmig gebogene Röhre gab 775 Schwingungen in der Secunde. Die danach berechnete Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles im Wasser zeigte Abweichungen von der direct durch Colladon und Sturm beobachteten, und solche Abweichungen haben sich bis auf die neueste Zeit ergeben.

Von grösster Wichtigkeit und mit Recht berühmt unter den Physikern sind endlich Savart's Versuche über die Grenzen der Hörbarkeit, weil sie zum ersten Male mit Apparaten angestellt wurden, welche eine directe Zählung der Schwingungsanzahl eines Tones erlaubten. Bis zu diesen Zeiten hatte man die Schwingungszahl eines Tones nie direct zu zählen, sondern immer nur indirect zu berechnen vermocht; Stancari's Rad war kaum von Jemand anderem als von Stancari selbst gebraucht worden, und auch dieser hatte kein genaues Resultat veröffentlicht. Den ersten mechanischen Zähler von Tonschwingungen construirte Cagniard-Latour im Jahre 1819[2]) und gab demselben so euphemistisch wie möglich den Namen Sirene. Sie bestand der Hauptsache nach aus einer sehr leicht um eine Achse drehbaren, metallenen Scheibe, in deren Rand ganz gleichmässig breite, rechteckige Zahnlücken zwischen ebenso breiten Zähnen eingeschnitten, oder in deren Fläche gleich grosse, gleich weit auf der Peripherie eines Kreises von einander abstehende Löcher eingeschlagen waren. Aus der Mündung einer engen Röhre konnte man Luft oder sonstige Flüssigkeiten gegen die Zähne oder Zahnlücken strömen lassen; bei der Umdrehung der Scheibe wurde dann der Strom der Flüssigkeiten immer abwechselnd unterbrochen und erzeugte so einen bestimmten Ton. Die Zähne am Rande oder die Löcher in der Scheibe wurden bald schief

---

[1]) Ann. de chim. et de phys. LVI, p. 280, 1834; Pogg. Ann. XXVI, S. 352, 1832.

Charles Cagniard-Latour (1777—1859), Ingénieur-Géographe, später im Ministerium des Innern in Paris.

[2]) Sur la Sirène, Ann. de chim. et de phys. XII, p. 167 und XVIII, p. 438. In Pogg. Ann. VIII, S. 456 (1825) erwähnt Chladni die Sirene nur beiläufig als Beispiel, dass Töne ohne klingende Körper möglich seien.

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

eingeschnitten, so dass der Flüssigkeitsstrom selbst die Scheibe bewegte. Ein Zählwerk, welches man beliebig mit dem rotirenden Rade verbinden oder ausser Verbindung setzen konnte, bestimmte die Zahl der Umdrehungen des Rades und die Geschwindigkeit der Schwingungen. Seebeck[1]) gebrauchte später für theoretische Untersuchungen mehrfach die Sirene und empfahl sie damit zu allgemeinerer Benutzung. Er bemühte sich auch um die Verbesserung des Apparates und versah z. B. die Scheibe mit mehreren concentrischen Kreisen von Löchern, um auch Akkorde von Tönen direct vergleichen zu können. Auch Savart[2]) benutzte zur Bestimmung der oberen Grenze der Hörbarkeit eine Sirene, erzeugte aber der grösseren Schärfe wegen den Ton nicht durch einen Luftstrom, sondern durch einen kleinen keilförmigen Körper, z. B. ein Kartenblatt, gegen das er die Zähne des Sirenenrades schlagen liess. Er fand so Töne noch hörbar, die 24 000 Stösse oder 48 000 einfache Schwingungen in einer Secunde machten. Da aber schon bei 15 000 Stössen die Töne sehr schwach und danach fast unmerklich wurden, so war auf diese Weise die Grenze der Hörbarkeit nicht genau zu bestimmen. Jedenfalls hing die Grenze der Hörbarkeit von der Art der Tonerzeugung selbst ab. Um die Grenzen der Hörbarkeit gegen die tiefen Töne möglichst zu bestimmen, construirte Savart[3]) einen anderen Apparat. Er befestigte eine Eisenstange von $2^1/_2{}'$ Länge, $2''$ Breite und $6'''$ Dicke so an eine Achse, dass diese die breiteren Seiten schnitt. Als dann diese Stange mittelst der Achse in eine rotirende Bewegung versetzt und an jede Seite derselben dünne Brettchen so befestigt wurden, dass die Eisenstange zwischen denselben, jedenfalls in keiner grösseren Entfernung als 1 mm von jedem, hindurchschlug, ohne die Brettchen doch zu berühren, so entstand ein so starker Ton, dass weder menschliche Stimmen, noch Orgelpfeifen davor gehört werden konnten. Nach dem Urtheil mehrerer anwesender Personen wurde dabei ein ausgehaltener Ton von 14 bis 16 einfachen Schwingungen in der Secunde noch gehört. Indessen hält Savart auch diese Grenze noch für keine absolute, weil auch tiefere Töne zu bemerken waren, wenn die Eisenstange noch länger angenommen wurde. Ueber die Bewegungen im Ohr gab Savart ebenfalls werthvolle Aufschlüsse. Er

---

[1]) Ludw. Friedr. Wilh. Aug. Seebeck (27. Dec. 1805 Jena — 19. März 1849 Dresden, Sohn von Thomas Joh. Seebeck, Gymnasiallehrer in Berlin (1830) und Lehrer an der Kriegsschule, seit 1843 Director der technischen Bildungsanstalt in Dresden): Beobachtungen über einige Bedingungen zur Entstehung von Tönen, Pogg. Ann. LIII, S. 417, 1841; über die Sirene, Pogg. Ann. LX, S. 449, 1843. Seebeck schrieb auch für Dove's Repertorium die akustischen Artikel.

[2]) Sur la sensibilité de l'organe de ouïe, Ann. de chim. et de phys. XLIV, 1830. Pogg. Ann. XX, S. 290, 1830.

[3]) Sur la perception des sons graves, Ann. de chim. et de phys. XLVII, p. 69, 1831; Pogg. Ann. XXII, S. 596.

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

zeigte [1]), dass eine wenig gespannte Membran durch alle Laute in Vibration geräth und dass sie durch Luftschwingungen gerade so erregt wird, wie durch einen festen Körper, der senkrecht gegen dieselbe steht. Damit war die gangbare Meinung widerlegt, dass das Trommelfell auf jeden einzelnen Ton umgestimmt werden müsste und war bewiesen, dass die Gehörknöchelchen vor Allem zur Fortleitung der Schwingungen dienen.

Diesen Untersuchungen, die mehr oder weniger alle auf der Bewegung der Molecüle der Körper oder wenigstens auf Veränderung des molecularen Zustandes der Körper beruhten und darum ebensowohl ihrerseits zur Ausbildung einer Molecularphysik drängten, als sie selbst Etappen auf dem Wege zu einer solchen schienen, schloss sich eine neue Entdeckung an, von der man in dieser Hinsicht ebenfalls nicht wenig erwartete. Der Hütteninspector Schwarz auf der Seigerhütte zu Hettstädt bemerkte im Januar 1805, als er eine eben erstarrte Silberplatte auf den Amboss zur schnelleren Abkühlung gelegt hatte, dass dieselbe einen Ton gab. Gilbert machte dieser Entdeckung wegen eine Reise nach Hettstädt, bemerkte, dass der Ton von einem Zittern der Metallmasse begleitet war, und beschrieb diese Erscheinung in seinen Annalen [2]). Da er aber meinte, dass die Beobachtungen noch nicht zu einer Erklärung ausreichten, so unterblieben danach überhaupt weitere Versuche. 1829 wollte A. Trevelyan [3]) mit einem heissen Eisen Pech anstreichen und beobachtete, als er das zu heisse Eisen gegen einen Bleiblock legte, dieselbe Erscheinung. Er erkannte als Ursache der Vibrationen die Ausdehnung des kalten Metalls an den abwechselnden Berührungsstellen, ermittelte durch viele Versuche die Metalle, welche sich als Unterlage oder als Wackler eigneten, und bestimmte die zweckmässigste Form der letzteren. Faraday las am 1. April 1831 in der Royal Institution über diesen Gegenstand. Er schloss sich der Ansicht Trevelyan's an und erklärte die Ueberlegenheit des Bleies als kaltes Metall durch die grosse thermische Ausdehnung desselben verbunden mit geringer Leitungsfähigkeit [4]). Forbes, welcher bei Faraday zugehört, las am 18. März und 1. April 1833 vor der Königlichen Gesellschaft zu Edinburg über dasselbe Thema. Er nahm an, dass beim Uebergang der Wärme aus einem Körper von grösserer zu einem von geringerer Leitungsfähigkeit eine abstossende Wirkung, ein Rückstoss (wie beim Ausströmen jeder Flüssigkeit) durch die Wärme ausgeübt werde und kam durch Versuche zu folgenden Gesetzen: 1) die Schwingungen finden niemals zwischen Sub-

[1]) Rech. sur les usages de la membrane du tympan et de l'oreille externe, Ann. de chim. et de phys. XXVI, 1824.

[2]) Gilbert's Ann. XXII, S. 323, 1806.

[3]) Edinburgh Courant, 26. Febr. 1831; Phil. Mag. XVII, 1833; Pogg. Ann. XXIV, S. 466, 1831; XXXIII, S. 554, 1833.

[4]) On Trevelyan's experiment on the production of sound, Journ. of the Royal Inst. II, 1831; Pogg. Ann. XXIV, S. 470.

Wellenlehre u. Akustik, c. 1820 bis c. 1840.

stanzen gleicher Natur statt; 2) beide Substanzen müssen metallisch sein; 3) die Vibrationen geschehen mit einer dem Ueberschuss des Wärmeleitungsvermögens proportionalen Intensität, und das Metall von dem schlechteren Leitungsvermögen muss nothwendig das kältere sein [1]). Seebeck [2]) kam jedoch zu abweichenden Resultaten. Er constatirte: Jedes heisse Metall kann auf jedem kalten (von gleichem oder verschiedenem Stoff) in dauernde Schwingungen versetzt werden, wenn ihre Gestalt so gewählt wird, dass die Wärme sich in dem kalten bedeutend weniger zur Seite ausbreitet als die Kälte in dem heissen. Tyndall [3]) widerlegte alle drei Gesetze von Forbes. Er erhielt Töne von Eisen auf Eisen, Kupfer auf Kupfer, Messing auf Messing, Silber auf Silber, Zink auf Zink, Zinn auf Zinn; Messing auf Bergkrystall, auf Rauchtopas, Flussspath, vorzüglich aber auf Steinsalz, das sich zu diesen Versuchen als besonders geeignet zeigte. In Bezug auf die Erklärung der Töne hielten dann Tyndall und mit ihm die Physiker überhaupt an der älteren Trevelyan-Faraday'schen Ansicht fest.

Noch bleibt uns aus dieser Periode die endliche Aufhellung des Wesens der Combinationstöne zu erwähnen. W. Weber hatte noch 1828 [4]) gemeint, dass man die Combinationstöne zweier zusammenklingender einfacher Töne finde, wenn man den Bruch aus den Schwingungszahlen dieser Töne in einen Kettenbruch entwickele und die Näherungswerthe des letzteren nehme, doch machte er selbst auf den starken Unterschied zwischen den berechneten und beobachteten Werthen aufmerksam. Hållström [5]) dagegen gab die viel einfacheren aber richtigeren Gesetze, dass der erste Combinationston durch die Differenz der Schwingungen der einfachen Töne bestimmt werde, und dass die anderen Combinationstöne höherer Ordnung aus dem Zusammenklange der einfachen Töne mit den Combinationstönen niederer Ordnung entstünden. Scheibler [6]) kam principiell zu demselben Ergebniss und verwerthete dasselbe zum Reinstimmen der Töne mit Hülfe einer Reihe von Stimmgabeln, deren Schwingungszahlen in Differenzen von vier wuchsen.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

Die Fortschritte der **Lehre von der Elektricität** in den dreissiger, vierziger und fünfziger Jahren lassen sich bis auf wenige Ausnahmen an die Person Michael Faraday's anknüpfen. Nicht bloss, dass dieser durchaus originelle und unzweifelhaft geniale Physiker

---

[1]) Edinburgh Phil. Trans. XII, 1834: Exp. researches regarding certain vibrations, which take place between metallic masses having diff. temp.; Pogg. Ann. XXXIII, S. 553.

[2]) Pogg. Ann. LI, S. 1, 1840.

[3]) Phil. Magazine (4) VII, 1854; Pogg. Ann. LXXXXIV, S. 613 bis 628, 1855; Wärme als eine Art der Bewegung, Braunschweig 1875, S. 164 bis 169.

[4]) Pogg. Ann. XV, S. 216, 1828.

[5]) Ibid. XXIV, S. 438, 1831.

[6]) Ibid. XXXII, S. 333, 492, 1834.

Faraday, elektrische Untersuchungen c. 1830 bis c. 1850.

alle Arbeiten auf jenem Gebiete prüfend wiederholte, bestätigte oder berichtigte, dass er selbst bei den grossartigsten Entdeckungen auf demselben schöpferisch thätig war; er erfasste auch das Wesen der Elektricität schon in jener theoretischen Allgemeinheit, welche dieses Gebiet der Physik erst in der richtigen organischen Verbindung mit den anderen Gebieten der Wissenschaft erscheinen liess, und er schon hatte die klare Einsicht und das sichere Vertrauen in die Einheit aller Naturkräfte, welche die moderne Physik erst nach längerer Zeit und nach vielen Kämpfen sich erworben hat. Die Idee von der gegenseitigen Umwandlungsfähigkeit der Naturkräfte beherrschte alle seine physikalischen Arbeiten und war bei seinen bedeutendsten Entdeckungen der leitende Gedanke. Wenn er selbst zu einem bestimmten Ausdruck für die Constanz der Kräftequantitäten bei allen Kräftetransformationen nicht kam, so lag das vielleicht weniger an der Kraft und der Anlage seines Geistes, als an der bestimmten Richtung, die seine Arbeiten und seine Gedanken durch seine äussere Lebenslage und Stellung genommen hatten.

Faraday's [1]) erste Arbeiten waren chemische; sie erschienen von 1816 an in dem von der Royal Institution herausgegebenen Quar-

---

[1]) Michael Faraday wurde am 22. September 1791 in Newington Butts bei London als Sohn eines Hufschmiedes geboren. Im Alter von 13 Jahren trat er bei einem Buchhändler und Buchbinder als Lehrling ein, um da 8 Jahre zu bleiben. Während dieser Zeit las er Mrs. Marcet's Gespräche über Chemie und aus der Encyclopaedia Britannica die Abhandlungen über Elektricität, bemühte sich auch, die dort angegebenen Versuche zu wiederholen. 1810 und 1811 erlaubte ihm sein Meister an einigen Abenden populäre Vorlesungen eines Herrn Tatum über Physik zu besuchen. 1812 ermöglichte ihm ein Kunde seines Meisters und Mitglied der Royal Institution, Mr. Dance, die vier letzten Vorlesungen Humphrey Davy's zu hören. Faraday, der nach Beendigung seiner Lehrzeit in ein anderes Geschäft eingetreten, gefiel sich darin sehr schlecht und suchte nach besserer Beschäftigung. Auf Anrathen von Mr. Dance sandte er eine Ausarbeitung der gehörten Vorlesungen an Davy, durch den er 1813 die Stelle eines Assistenten im Laboratorium der Royal Institution (mit 25 Sh. Gehalt die Woche und einer Wohnung von zwei Zimmern) erhielt. Am 13. Octob. 1813 trat er mit Davy eine Reise durch Frankreich, Italien, die Schweiz etc. an, von der sie am 23. April 1815 zurückkehrten. Im Jahre 1816 hielt er vor einem kleinen Kreise seine ersten Vorlesungen: „Eine Darstellung der Eigenschaften, die der Materie inne wohnen, der Formen der Materie und der elementaren Stoffe.“ Als Mr. Brande an Davy's Stelle Prof. der Chemie an der Royal Institution wurde, ernannte man Faraday zum Director des Laboratoriums; um das Jahr 1827 folgte er Brande auch in der Professur. Am 8. Januar 1824 war er, nicht ohne vorheriges Widerstreben Davy's, zum Mitglied der Royal Society gewählt worden. Mit dem Jahre 1831 häuften sich die Ehren auf seinem Scheitel; nach J. H. Gladstone (Michael Faraday, deutsche Uebersetzung, Glogau, ohne Jahreszahl, S. 205 bis 206) wurde er von ca. 68 gelehrten Körperschaften zum Mitglied oder Ehrenmitglied ernannt. Faraday starb am 25. August 1867 zu Hampton Court bei London. (Faraday und seine Entdeckungen von Tyndall, Braunschweig 1870).

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

terly Journal of Science. Im Jahre 1818 leitete er seinen Uebertritt zur Physik mit einer Abhandlung über die singenden Flammen ein. 1822 folgte dieser die erste elektrische Arbeit, die schon erwähnte Abhandlung über die elektromagnetischen Rotationsbewegungen. Bis zum Jahre 1831 veröffentlichte er, neben kleineren chemischen Untersuchungen, die Aufsehen erregenden, gelungenen Versuche über Verflüssigung des Chlors und einiger anderen Gase, eine Abhandlung über die Grenzen der Verdunstung, die Erklärung der Staubfiguren auf schwingenden Platten und endlich die erwähnte Theorie des Trevelyan-Instruments. Vom Jahre 1831 an aber concentrirten sich Faraday's Kräfte auf die Ausbildung der Elektricitätslehre. In diesem Jahre begann er in den Philosophical Transactions die Veröffentlichung seiner Experimental researches in electricity, die er bis zum Jahre 1855 in 30 Serien mit über 3000 Paragraphen fortsetzte. Gleich die erste Serie dieser Researches enthält die Entdeckung der galvanischen Induction [1]).

Die Erkenntniss von der Identität der Reibungs- und der galvanischen Elektricität liess aus der elektrischen Influenz auf die Existenz einer galvanischen Induction schliessen, die Constatirung der Einheit des Magnetismus und der Elektricität durch Ampère musste bei der Erinnerung an die magnetische Induction die Sicherheit jenes Schlusses verstärken. Dass die Physiker trotz Ampère's Nachweis dieser Induction dieselbe nicht verstanden, dass auch Ampère danach den Erfolg seiner Entdeckung nicht ausbeutete, war Faraday's allgemeiner begründeten Ideen über die Einheit der Kräfte gegenüber nicht von entscheidendem Einfluss. So konnte Faraday, der durch die weitere Ausbildung des Galvanometers Ampère gegenüber in entschiedenem Vortheil war, die Wirksamkeit der galvanischen Induction auch dem Widerwilligsten sicher nachweisen. Doch sollte auch er dieses Resultat nicht mühelos gewinnen. Faraday wickelte zwei übersponnene und dadurch isolirte Drähte neben einander auf eine hölzerne Rolle, setzte die Enden des einen Drahtes mit einer Batterie von 10 Elementen, die des anderen mit einem Galvanometer in Verbindung und fand, während der Dauer des Stromes im ersten Drahte, im zweiten — auch nicht die Spur von inducirter Elektricität. Er verstärkte seine Batterie auf 120 Elemente, nur um denselben negativen Erfolg zu erhalten; der Strom floss ruhig durch den Draht der Batterie, ohne dass das Galvanometer in dem anderen Drahte auch nur eine Spur von Galvanismus angezeigt hätte. Erst bei fort-

---

[1]) Exp. res. in electr., Series I: Induction of electric currents; evolution of electricity from magnetismus; new electrical state or condition of matter; explication of Arago's magnetic phenomena; Phil. Transactions 1831. Exp. res. in electr., Series II: Terrestrial magneto-electric induction; force and direction of magneto-electric induction generally; Phil. Trans. 1832. Beide Serien übersetzt in Pogg. Ann. XXV, 1832.

gesetzten Versuchen, die Faraday mit der Zähigkeit eines ideell Ueberzeugten anstellte, stellte sich die erwartete inducirende Wirkung doch noch ein. Sie trat nur nicht während der ganzen Dauer des Stromes, sondern einzig beim Oeffnen und Schliessen desselben auf. Jedesmal, wenn die Verbindung des Batteriedrahtes mit der Batterie hergestellt oder unterbrochen wurde, zeigte die Nadel des Galvanometers durch eine schwache Bewegung in dem zweiten Drahte einen allerdings nicht constant fliessenden, sondern nur momentan existirenden Strom an, einen Strom, der seiner Natur nach, „eher einer elektrischen Welle aus einer Leydener Flasche, als dem elektrischen Strome aus einer Volta'schen Batterie gleichkommt". Nachdem aber so einmal das Eis gebrochen war, gelang es nun schnell alle Eigenthümlichkeiten und Gesetze der galvanischen Induction anzugeben. Faraday constatirte, dass der durch die Schliessung des Stromes erhaltene inducirte Strom dem ersten entgegengesetzt, der durch Unterbrechung erhaltene aber gleichgerichtet war, und was principiell das Wichtigste, dass nicht bloss durch Unterbrechung oder Schliessung des inducirenden Stromes, sondern auch durch Annäherung und Entfernung der inducirenden Stromspirale in der Inductionsspirale ein Strom entstand, dass also die wirkende Ursache in der Induction eine Bewegung oder eine mechanische Kraft ist. Faraday nannte diese Induction durch galvanische Ströme die Voltainduction. Aus der Ampère'schen Theorie folgte aber, dass dieser auch eine Magnetinduction zur Seite stehen müsse, und in der That konnte Faraday direct nachweisen, dass in einer Drahtspirale, wie durch Annähern oder Entfernen eines Stromes, auch durch Annähern oder Entfernen eines Magneten Ströme inducirt werden, und dass auch jede Veränderung in der Lage einer Inductionsspirale gegen die Erde einen Inductionsstrom hervorrufe.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

Aus der Thatsache, dass jede Lagenveränderung eines Stromes oder eines Magneten gegen einen Stromleiter in diesem Elektricität und damit auch Magnetismus erzeugt, erklärten sich dann die bis dahin so räthselhaften Erscheinungen des Arago'schen Rotationsmagnetismus. Faraday vermochte aus einer zwischen den Polen eines Magneten rotirenden Kupferscheibe, wenn er die Drahtenden eines Leitungskreises bezüglich auf dem Rande und auf der Achse der Scheibe schleifen liess, den inducirten Strom direct abzuleiten und sogar elektrische Funken durch denselben zu erhalten. Wie allgemein Faraday die Beziehung zwischen Bewegung und Erzeugung von Elektricität fasste, ersieht man aus seinen Worten: „Theoretisch scheint es eine nothwendige Consequenz, dass sich elektrische Strömungen da bilden müssen, wo Wasser fliesst. Wenn man sich eine Linie durch die See von Dover nach Calais gehend, und in der Erde unterhalb des Wassers nach Dover zurückkehrend denkt, so umfasst diese Linie einen Kreis leitender Masse, von welcher ein Theil die mag-

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

netischen Curven der Erde durchschneidet, so lange das Wasser den Canal auf- oder abwärts strömt, während der andere Theil der Masse in relativer Ruhe bleibt. Man hat allen Grund anzunehmen, dass Ströme in der Hauptrichtung des beschriebenen Stromkreises stattfinden müssen, entweder in der einen oder anderen Richtung, je nachdem das Wasser im Canal auf- oder abwärts strömt [1])."

Doch zeigten sich solche Beziehungen bald noch inniger, selbst als hier angedeutet wird. William Jenkin und ungefähr gleichzeitig auch Masson [2]) beobachteten im Jahre 1834, dass der Oeffnungsfunke eines elektrischen Stromes viel stärker wird, wenn man den Leitungsdraht verlängert, und noch mehr, wenn man aus dem Leitungsdrahte eine Spirale bildet und einen Eisenkern in dieselbe schiebt. Da durch diese Vorrichtung die Stromintensität aber nicht verstärkt, sondern nur verringert werden kann, so blieb diese Erscheinung beiden Entdeckern räthselhaft. Faraday erkannte dieselbe direct als eine Wirkung der Induction [3]), welche der galvanische Strom bei der Unterbrechung auf den eigenen Leitungskreis ausübt. Es gelang ihm danach auch bei der Schliessung des ursprünglichen Stromes einen solchen Extrastrom (extra current, wie Faraday's Bezeichnung lautet) nachzuweisen, der nur dem Oeffnungsstrom entgegengesetzt war. Der Oeffnungsstrom ist dem ursprünglichen Strom gleichgerichtet und verstärkt denselben, der Schliessungsstrom wirkt umgekehrt. Die Extra currents fanden im Anfange manche Gegner, vor Allem wollte Dove [4]) nicht zugeben, dass zur Erklärung dieser Erscheinung die Annahme solcher Inductionswirkungen nöthig und thunlich sei. Doch bestätigten Jacobi [5]) und Andere die Annahmen Faraday's, und später hat Helmholtz [6]) vor Allem die Wichtigkeit dieser Ströme für theoretische wie praktische Betrachtungen gezeigt.

Die Inductionserscheinungen im Allgemeinen dagegen fanden nun unter den Physikern keine Gegner mehr, sondern vielmehr eine begeisterte Aufnahme und schnelle Bestätigung. Nobili und Antinori [7]) erhielten noch im Jahre 1831 elektrische Funken aus inducirten Strömen, die

[1]) Vergl. Faraday und seine Entdeckungen von Tyndall, Braunschweig 1870, S. 30.

[2]) Hoppe, Geschichte der Elektricität, Leipzig 1884, S. 413. Faraday selbst führt nur die Beobachtungen von Jenkin an. (Phil. Trans. 1835, p. 41.)

[3]) Exp. res., Ser. IX: Induction of an electric current of itself; inductive action of electric currents generally, Phil. Trans. 1835. Pogg. Ann. XXXV, 1835.

[4]) Repertorium d. Physik I, S. 334 bis 341. Heinrich Wilhelm Dove (6. Octob. 1803 Liegnitz — 4. April 1879 Berlin), habilitirte sich 1826 in Königsberg, wurde 1829 ausserordentlicher und 1845 ordentlicher Prof. der Physik in Berlin; seit 1846 Leiter des in diesem Jahre gegründeten meteorologischen Instituts für Preussen.

[5]) Pogg. Ann. XLV, S. 132, 1838.

[6]) Ibid. LXXXIII, S. 505, 1851.

[7]) Ibid. XXIV, S. 473, 1832.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

alle Welt höchlich erstaunten. Ritchie[1]) wollte die Erscheinungen der Induction als eine directe, offenbare Folge des Princips von der Gleichheit der Wirkung und Gegenwirkung darstellen. Lenz[2]) aber bewies erst durch zahlreiche Versuche, dass allerdings die Inductionserscheinungen jenem Gesetze entsprechen und so auch ihrerseits dasselbe auf elektrischem Gebiete bestätigen. „Wenn sich," sagt der Letztere, „ein metallischer Leiter in der Nähe eines galvanischen Stromes oder eines Magneten bewegt, so wird in ihm ein Strom erregt, der eine solche Richtung hat, dass er in dem ruhenden Drahte eine Bewegung hervorgebracht hätte, die der hier dem Drahte gegebenen gerade entgegengesetzt wäre, vorausgesetzt, dass der ruhende Draht nur in der Richtung der Bewegung und entgegengesetzt beweglich ist."

Schneller als bei vielen anderen Gelegenheiten wurde auch die allgemeine theoretisch-principielle Bedeutung der neuen Erscheinung von den Physikern gewürdigt, und mehr als irgend ein bis dahin bekannt gewordenes Moment sprach und wirkte dieses für eine allgemeine Auffassung des Begriffes der Kraft, und drängte dieses zur Idee von der Transformationsfähigkeit aller Kraftformen in einander.

Der Ampère'schen Lehre von der ursächlichen Identität der magnetischen und elektrischen Erscheinungen wurde die galvanische Induction zu einer so sicheren Stütze, dass mit ihrem Auftreten alle anderen Theorien des Elektromagnetismus verschwanden. Berzelius bemerkte gleich beim Erscheinen der ersten Serie von Faraday's Untersuchungen, dass danach Ampère's Theorie unzweifelhaft richtig erscheine[3]). Im nächsten Jahre versuchte er die neue Entdeckung auch zur Stütze seiner eigenen Theorie von der Identität der chemischen Affinität mit den elektrischen Kräften zu benutzen. „Ich brauche kaum hinzuzufügen," behauptet er[4]), „wie dieses Verhalten, dass die Bewegung eines Magneten die Ursache der Aufhebung von chemischen Verwandtschaften wird, der unumstösslichste Beweis für den innigen Zusammenhang der chemischen Verwandtschaften mit der Elektricität und für ihre Bedingung ist."

Den bedeutendsten Einfluss aber und den folgereichsten übte die Entdeckung der galvanischen Induction auf die Klärung der Reciprocität des Verhältnisses zwischen Elektricität und mechanischer Kraft. Dass man mit Hülfe der Elektricität sehr bedeutende mechanische

---

[1]) Phil. Mag. (3) IV, 1834. Pogg. Ann. XXXI, S. 203, 1834.

[2]) Pogg. Ann. XXXI, S. 483, 1834. Heinr. Friedr. Emil Lenz (12. Febr. 1804 Dorpat — 10. Febr. 1865 Rom), 1823 bis 1826 Physiker der Kotzebue'schen Expedition, 1828 Adjunct und 1834 Mitglied der Akademie der Wissenschaften in Petersburg, daneben Prof. an der Universität.

[3]) Jahresber. über die Fortschr. der Physik und Chemie XII, S. 38, 1832.

[4]) Jahresber. XIII, S. 41, 1833.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

Kräfte entwickeln könne, darüber war man eben noch vor der Entdeckung der Induction durch die Construction von Elektromagneten klar geworden. Diese letztere Construction aber hatte schon länger auf sich warten lassen, als nöthig gewesen. Das Solenoid Ampère's vom Jahre 1822 war eigentlich schon ein Elektromagnet. Dass man die magnetischen Wirkungen eines Stromes durch vielmaliges Umwinden des Leitungsdrahtes beträchtlich verstärken und dabei die Windungen durch Umspinnen mit Seide isoliren könne, wusste man schon seit der Erfindung des Multiplicators. Trotzdem aber kam man erst einige Jahre später zu der Erfahrung, dass man durch Einschieben eines weichen Eisenkerns in die Spirale und vielmaliges festes Umwickeln dieses Kerns künstliche Magnete erhalten könne, welche alle natürlichen an Wirkung bedeutend überträfen. Und auch dann fand die Thatsache nicht direct die verdiente Beachtung, und die Physiker liessen sich von den ungeahnten mechanischen Wirkungen dieser Elektromagnete gewaltig überraschen[1]). Es ist sogar noch keineswegs klar, wer das Solenoid zuerst zum Elektromagneten wirklich umgewandelt hat. Fechner schreibt in seinem Repertorium der Physik (Bd. II, S. 48, 1832) die Erfindung desselben Pfaff zu. Mit Unrecht, denn Brewster hatte schon 1826 hufeisenförmige Elektromagneten construirt, und Sturgeon war um dieselbe Zeit zu dem nämlichen Ziele gekommen[2]). Professor Pfaff erzählt im Gegentheil, dass er in London einen Elektromagneten, wie ihn Sturgeon construirt, zuerst gesehen, und macht seinem Erstaunen über die Wirkung solcher Apparate in den Worten Luft: „Es grenzt an Zauberei, in dem Augenblicke, da man mit einem der Drähte den (galvanischen) Kreis schliesst und so den elektrischen Strom einleitet, selbst aus einiger Entfernung den mit 8 Pfund und darüber beschwerten Anker angezogen zu sehen, der ebenso augenblicklich wieder abfällt, wenn der Kreis unterbrochen wird[3]).“ Aehnliche Betrachtungen knüpft Berzelius[4]) an die Beschreibung des grossen Elektromagneten von Jos. Henry und Ten Eyk, der bei einer Erregung durch ein

---

[1]) Weder Fechner, der in seiner Uebersetzung von Biot's Traité de physique die Solenoide (1825) ausführlich beschreibt, noch Muncke, der in dem 1827 erschienenen Bande von Gehler's physikalischem Wörterbuch diese künstlichen Magnete der Beachtung nachdrücklichst empfiehlt, lassen Etwas von einem Gedanken an einen eigentlichen Elektromagnet auch nur ahnen.

[2]) Brewster, Edinb. Journ. of Science VI, 1826. William Sturgeon (1783 — 1850, erst lange Zeit Soldat, dann Lehrer der Physik): A complete set of novel electro-magnetic apparatus (Transact. soc. of arts 1825, Auszug: Philipp's Ann. of Phil. XII, 1826); nach Pogg. Handwörterb. II, S. 1042 enthält diese Abhandlung die Erfindung des Elektromagneten. Vergl. auch Wiedemann, die Lehre von der Elektricität III, S. 343, Braunschweig 1883.

[3]) Schweigger's Journ. der Physik LVIII, S. 275.

[4]) Jahresberichte XII, S. 45 bis 46, 1832.

Element von $4^7/_9$ Quadratfuss Oberfläche 2000 Pfund trug: „In der That kann man sich des Erstaunens nicht erwehren, wenn man die geringe Kraft betrachtet, welche bei dieser Verrichtung die unerhörte Anziehung der Magnetpole verursacht.“

Faraday, elektrische Untersuchungen c. 1830 bis c. 1850.

Gerade diese Aeusserungen machen es begreiflich, dass man nach dem Bekanntwerden der Elektromagnete direct dazu schritt die gewaltige mechanische Kraft derselben praktisch nutzbar zu machen, und dass man überschwengliche Hoffnungen von denselben hegte, die allerdings weniger einen Fortschritt zu den neueren Anschauungen von dem Wesen der Kraftwirkung erkennen lassen. Vielleicht hat gerade die später folgende Enttäuschung auch an ihrem Theile mit zur richtigen Ansicht von Arbeitsleistung und Kraftverbrauch geführt.

Die erste elektromotorische Maschine construirte Salvatore dal Negro im Jahre 1830 [1]). Sie bestand aus einem als Doppelpendel aufgehangenen, permanenten Stahlmagneten und einem festen Elektromagneten, der das obere Polende des vorigen zwischen seine Schenkel fasste. Der permanente Magnet änderte bei seinen Schwingungen den Strom im Elektromagneten selbstthätig um und wurde dadurch selbst in Bewegung erhalten. Bei einer zweiten Maschine war der permanente Magnet als Anker des Elektromagneten angewandt und an einem Balancier befestigt, dessen anderes Ende durch eine Kurbel mit einem Schwungrade in Verbindung stand. Auch hier kehrte der Balancier bei seiner Bewegung die Stromrichtung so um, dass immerwährend Anziehung und Abstossung wechselten [2]). Doch konnten die Leistungen beider Maschinen ihrer ganzen Anlage nach keine bedeutenden sein; die erste elektromotorische Maschine, welche zu wirklicher Arbeitsleistung gebraucht wurde, war diejenige, welche Jacobi im Jahre 1834 der Pariser Akademie beschrieb, und die dann im Jahre 1838 das berühmte, 26 Fuss lange, $8^1/_2$ Fuss breite, mit 12 Personen besetzte Boot auf der Newa bewegte [3]). Auch der Frankfurter J. P. Wagner, der Erfinder des sogenannten Neef'schen Hammers, glaubte 1840 nach vierjährigem rastlosen Streben den Standpunkt endlich erreicht zu haben, wo er mit fester Zuversicht die Ueberzeugung aussprechen konnte, dass nunmehr

[1]) Pogg. Ann. XLVII, S. 76, 1839. Joh. Müller's Bericht über die neuesten Fortschritte der Physik I, S. 538, Braunschweig 1849 bis 1852. Salvatore dal Negro, 1768 — 1839, Prof. der Physik und Mechanik an der Universität Padua.

[2]) Dal Negro soll schon mit seiner ersten Maschine 180 g in einer Minute 1 m hoch gehoben haben. Aehnliche Maschinen beschrieben Henry im American Journ. XX (July 1831) und Botto in Baumgärtner's Zeitschr. für Mathematik und Physik III, 1835.

[3]) Pogg. Ann. XXXVI, S. 366, 1835 und LI, S. 358, 1840. Moritz Hermann (von) Jacobi (21. Septemb. 1801 Potsdam — 10. März 1874 Petersburg), war anfangs preussischer Baubeamter, von 1835 bis 1840 Prof. der Baukunst in Dorpat, seit 1839 Adjunct und 1842 Mitglied der Petersburger Akademie.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

für die Industrie eine neue Triebkraft gewonnen sei. Der Bundestag sicherte dann am 22. April 1841 wirklich dem besagten J. P. Wagner für die Construction einer elektrischen Locomotive 100 000 Gulden zu, wenn sie bestimmte Bedingungen erfülle, zog aber durch Beschluss vom 13. Juni 1844, da dies letztere nicht geschehen konnte, seine Zusage endgültig zurück [1]), und damit war für lange Zeit überhaupt den elektromotorischen Maschinen das Urtheil gesprochen. Die ersten Erfinder hatten vielleicht gar nicht daran gedacht, dass der zur mechanischen Arbeit verwandte Strom Geld kosten könnte. Wagner meinte, dass die in den galvanischen Ketten entstehenden chemischen Verbindungen die Kosten der Ketten selbst mehr als decken würden; aber auch diese Hoffnung zeigte sich gänzlich unbegründet [2]).

Den Bemühungen um die Production von mechanischer Kraft durch Elektricität entsprachen nun nach Faraday's Entdeckung der Induction die Bestrebungen zur Production von Elektricität durch mechanische Arbeit. Eine Inductionsmaschine, welche diesen Zweck erreichte, war schon Faraday's Kupferscheibe, die zwischen den Polen eines Magneten rotirte und aus der er durch Schleifcontacte die elektrischen Ströme abfing. Sturgeon [3]) erzielte damit bereits stärkere Wirkungen dadurch, dass er den permanenten Magnet durch einen Elektromagneten ersetzte. Eine Maschine aber, die ergiebiger wirkte, construirte wieder erst Dal Negro [4]) im Jahre 1832, und in principiell ganz gleicher Weise Pixii [5]). Berzelius [6]) beschreibt die letztere nach den Annales de chimie et de physique in charakteristischer Weise als einen Apparat zur Erzeugung elektrischer Funken durch Magnete: Ein Hufeisenmagnet, der 34 Pfund trägt, ist so an einer Achse befestigt, dass er schnell um dieselbe gedreht

---

[1]) Stricker, Nekrolog des Herrn J. P. Wagner; Jahresber. d. phys. Ver. zu Frankfurt a. M. 1878 bis 1879, S. 32 bis 36. Joh. Phil. Wagner (24. Jan. 1799 Fischbach im Amt Langenschwalbach — 8. Jan. 1879 Frankfurt a. M.), war von 1815 bis 1840 Buchhalter in einem Eisengeschäft in Frankfurt a. M., lebte dann als Privatmann, vielfach mit physikalischen und technischen Arbeiten beschäftigt. Den elektromagnetischen Hammer zeigte er am 25. Februar 1837 im physik. Ver. in Frankfurt a. M. vor.

[2]) Joh. Müller, Bericht über die neuesten Fortschritte der Physik I, S. 543 bis 548, Braunschweig 1849 bis 1852.

[3]) Pogg. Ann. XXIV, S. 634, 1832.

[4]) Phil. Mag. (3) I, 1832.

[5]) Ann. de chim. et de phys. L u. LI, 1832; Pogg. Ann. XXVII, S. 390 bis 393, 1833.

[6]) Jahresberichte XIII, S. 41, 1833. Trotzdem man um diese Zeit an die Transformation der Kräfte schon vielfach gewöhnt war, imponirte bei der Induction doch am meisten, dass man durch sie aus Magneten (ohne sonstige Quellen der Elektricität) elektrische Funken erhalten konnte, eine Erscheinung, die allerdings unter der Herrschaft des Systems der elementaren, imponderablen Flüssigkeiten immer etwas Räthselhaftes behalten musste.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

werden kann. Ihm gegenüber ist ein hufeisenförmig gebogenes Eisen unbeweglich befestigt, so dass die Enden desselben den Polen des Magneten gerade gegenüber stehen, ohne dieselben zu berühren. Dieses Eisen ist mit einem 50 m langen, mit Seide übersponnenen Messingdraht umwickelt, von dem das eine Ende in ein Näpfchen mit Quecksilber taucht, das andere aber, ohne das Quecksilber zu berühren, dicht über der Oberfläche desselben befestigt wird. Dreht man nun den Magneten sehr schnell, so springen unaufhörlich zwischen Quecksilber und dem Draht Funken über, so schnell, dass sie in eins zusammenfliessen. Richtet man aber den Apparat so ein, dass bei jeder halben Umdrehung die Drahtenden umgewechselt werden, wie in dem bekannten elektromagnetischen Apparat von Ampère, so erhält man einen elektrischen Strom, der immer in derselben Richtung verläuft. Hierzu kann man aber nicht Quecksilber verwenden, weil das weggeschleudert wird, sondern muss Kupferscheiben mit Quecksilber amalgamiren. Durch diesen Apparat erhält man starke Schläge in den Armen, es wird Wasser zersetzt u. s. w. [1]). Lässt man die Ampère'sche Umwechselung weg, so wird auch Wasser zersetzt, aber man erhält ein Gemenge von Wasserstoff und Sauerstoff. Ampère hat mit einem Magnet, der 220 Pfund trug und dessen Draht 1000 m lang war, noch stärkere Wirkungen erhalten.

Die Stärke der elektrischen Ströme, welche diese Maschinen liefern, die bald von Ritchie, Clarke, Saxton u. A. verbessert wurden, ist vor Allem bedingt durch die Stärke des inducirenden Magneten. Man versuchte die Wirkung desselben zu vergrössern, indem man statt eines massiven Magneten ein magnetisches Magazin anwendete, aber auch da war die Wirkung eine eng begrenzte. Bessere Erfolge wurden erzielt, als der Mechanicus Emil Stöhrer 1844 mehrere magnetische Magazine, meist drei oder vier, in einem Kreise aufstellte und diesen ebenso viel Elektromagnete gegenüber brachte, die an eine gemeinschaftliche Achse befestigt, mit derselben drehbar waren. Diese Stöhrer'sche Maschine ist in Deutschland lange für die geeignetste zur Erzeugung starker Ströme angesehen worden und hat für die aufgehende Sonne im Propheten auf deutschen Bühnen vorzugsweise die Kraft geliefert. In Frankreich gebrauchte die Gesellschaft L'Alliance zur Erzeugung von elektrischem Licht eine Maschine, bei der durch eine andere Anordnung der magnetischen Magazine die Aufstellung einer noch grösseren Anzahl ermöglicht war. Bei einzelnen derselben wurden 40 magnetische Magazine verwandt, von denen jedes 120 Pfund wog, und solche Maschinen sind auch von der Gesellschaft bis in die letzte Zeit zur Erzeugung von Licht benutzt worden. Immerhin blieb auch bei diesen starken Strommaschinen die Einschiebung des Magnetismus zwischen die Transformation der mechanischen

[1]) Danach muss man die Erfindung des Commutators im Princip Ampère zuschreiben, die Späteren, Clarke, Saxton, Stöhrer etc., gaben demselben nur die sicherere praktischere Einrichtung.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

Kraft in Elektricität ein Uebelstand, der bei dem ungünstigen Verhältniss zwischen dem Gewicht und der magnetischen Kraft eines permanenten Magneten dem Gebrauch jener Inductionsmaschinen recht enge Grenzen setzte. Als ein zweiter Uebelstand kam noch dazu, dass die Ströme, welche alle diese Apparate lieferten, keine gleichförmigen waren, sondern sich aus Inductionsstössen zusammensetzten, die mit der Annäherung der Pole des Elektromagneten an die der festen Magnete bis zu einem Maximum anwuchsen und dann wieder abnahmen. Diese Ursachen verhinderten schliesslich doch eine allgemeine technische Verwendung jener Maschinen, und erst mit Beseitigung dieser beiden Uebelstände schlug in unserem Jahrzehnte die Geburtsstunde der Elektrotechnik.

Die beobachtete Aehnlichkeit inducirter Ströme mit Entladungsströmen der Reibungselektricität liess Faraday aufs Neue die Verhältnisse der aus verschiedenen Quellen erhaltenen Elektricitäten, vor Allem der galvanischen und der Reibungselektricität untersuchen. Er kam dabei zu dem Schlusse[1], dass dieselben in Wirklichkeit identisch seien und sich nur durch die Verhältnisse ihrer Quantität und Spannung unterschieden. Der elektrische Zustand eines Körpers hängt nämlich nicht bloss von der auf ihm vertheilten Quantität der Elektricität, sondern auch von der Vertheilung selbst und der daher resultirenden Spannung der Elektricität ab. Die Reibungselektricität hat bei geringer Quantität eine sehr grosse Spannung, bei der galvanischen Elektricität ist das Verhältniss umgekehrt. Wenn man einen Platin- und einen Zinkdraht von $1/6''$ Dicke, in einem Abstande von $5/16''$ von einander und $5/8''$ tief in ein Gemisch von einer Unze Wasser und einem Tropfen Schwefelsäure taucht, so erhält man in sechs Secunden ein eben so grosses Quantum Elektricität, als eine sehr grosse und kräftige Elektrisirmaschine bei 30 Umdrehungen giebt. Die Quantität der Elektricität, die nöthig ist, um ein Gran Wasser zu zersetzen, würde genügen, um eine grosse Leydener Flasche 800 000 mal zu füllen; ihre momentane Entladung würde der Wirkung eines starken Blitzes gleichkommen. Faraday scheut sich fast, solche Zahlen auszusprechen; spätere Messungen von Pfaff, Becquerel, W. Weber und R. Kohlrausch aber haben ähnliche grosse Werthe ergeben[2].

Damit war Faraday bei der Verbindung der Elektricität mit der chemischen Affinität, bei der Betrachtung der chemischen Wir-

---

[1] Exp. res., Ser. III: Identity of electricities of different sources; relation by measure of common and voltaic electricity, Phil. Trans. 1833; Pogg. Ann. XXIX, 1833.

[2] Faraday und seine Entdeckungen von Tyndall, Braunschweig 1870, S. 41 bis 42. G. Wiedemann, Die Lehre von der Elektricität IV, S. 1005 bis 1006, Braunschweig 1885.

kungen der Elektricität angelangt; einer Betrachtung, die ihm bei seinem Verhältniss zur Chemie und dem ganzen Gange seiner Bildung besonders nahe lag, und die auch für seine ganze Auffassung des Verhältnisses der Naturkräfte von besonderer Wichtigkeit ist. Bevor er aber seine vielfältigen Untersuchungen über diese chemischen Zersetzungen vollendete und veröffentlichte, sandte er Untersuchungen über das dabei in Betracht kommende Leitungsvermögen der Körper und der Flüssigkeiten insbesondere voraus [1]. Feste Körper, vor Allem Metalle, leiten den galvanischen Strom ohne chemische Veränderungen zu erleiden; Flüssigkeiten aber werden dabei durch den elektrischen Strom zersetzt. Ist dies letztere ausnahmslos der Fall oder können auch Flüssigkeiten den Strom wie Metalle leiten? Faraday meinte wenigstens in einem Falle eine solche Leitung bemerkt zu haben und hielt danach für möglich, dass Flüssigkeiten ausser dem sogenannten elektrolytischen Leitungsvermögen auch ein metallisches, allerdings sehr schwaches, besitzen könnten. Es ist dies einer der wenigen Fälle, vielleicht der einzige, wo Faraday auf experimentellem Gebiete nicht von der Nachwelt bestätigt wurde [2].

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

Aus den nun folgenden Veröffentlichungen über die chemische Zersetzung durch den elektrischen Strom [3]) kann man schon genauer die Entwickelung von Faraday's Ansichten über das Wesen der Naturkräfte, vor Allem seine Abneigung und seine Ungläubigkeit in Bezug auf jede Wirkung der Körper in die Ferne, jede actio in distans, erkennen. Faraday polemisirt nachdrücklich gegen den Ausdruck Pole des elektrischen Stromes und gegen die Ansicht, als ob die Wirkung des galvanischen Stromes auf die Flüssigkeiten, durch welche er hindurchgeht, von einer Anziehung herrühre, die unmittelbar von einem Pole durch die Flüssigkeit hindurch bis zum anderen Pole wirke. Er zeigte zuerst, dass der Entladungsstrom einer Leydener Flasche ebenso wie ein galvanischer Strom die Flüssigkeiten zersetze. Dann verband er ein Stück Curcumapapier, das mit schwefelsaurem Natron angefeuchtet war, mit dem positiven Conductor seiner grossen Elektrisirmaschine und stellte diesem Papier in geringem Zwischenraum eine metallene Spitze gegenüber, die mit den Gasröhren des Gebäudes in leitender Verbindung stand. Wenn er hierauf

[1]) Exp. res., Ser. IV: New law of electrical conduction; on conducting power generally, Phil. Trans. 1833. Pogg. Ann. XXXI, 1834.

[2]) G. Wiedemann, Die Lehre von der Elektricität II, S. 488, Braunschweig 1883.

[3]) Exp. res., Ser. V: Electro-chemical decomposition, Phil. Trans. 1833. Pogg. Ann. XXXII, 1834.

Exp. res., Ser. VII: Electro-chemical decomposition, continued; electro-chemical equivalents; Phil. Trans. 1834. Pogg. Ann. XXXIII, 1834. Die VI. Serie der Experimentaluntersuchungen über Elektricität enthält die Untersuchungen über die sogenannte katalytische Kraft der Metalle, die nicht hierher gehören.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

die Maschine drehte, und die Elektricität sich aus dem Papier durch die Luft gegen die Spitze hin entlud, so bräunte sich das Papier, zum Zeichen, dass das schwefelsaure Natron zersetzt worden war. Faraday meinte, dass hier weder von einer Anziehung zweier Pole, noch von den letzteren selbst die Rede sein könne; die Zersetzungen gingen also nicht durch Anziehungen und Abstossungen gewisser Punkte, sondern durch ein Aufheben oder Neutralisiren der chemischen Affinitäten vor sich. „Was wir einen elektrischen Strom nennen, ist eine Achse von Kraft, die in entgegengesetzter Richtung mit entgegengesetzten Kräften zu absolut gleichem Belauf wirkt. Die elektrische Zersetzung beruht auf einer in der Richtung des elektrischen Stromes ausgeübten, inneren Corpuscular-Attraction und rührt von einer Kraft her, die entweder hinzugekommen ist, oder der gewöhnlichen chemischen Affinität der vorhandenen Körper bloss Richtung giebt. Der Körper, der zersetzt wird, kann als eine Masse von wirkenden Partikeln betrachtet werden, von denen alle diejenigen, welche innerhalb des Laufes des elektrischen Stromes eingeschlossen sind, zur Einwirkung beitragen. Dadurch, dass die gewöhnliche chemische Affinität durch den elektrischen Strom in einer mit diesem parallelen Richtung aufgehoben, geschwächt oder bis zu einem gewissen Grade neutralisirt und in der entgegengesetzten Richtung verstärkt oder hinzugefügt ist, streben die Partikel der Verbindungen nach entgegengesetzten Seiten zu gehen." „Nach meiner Ansicht entstehen die Wirkungen von inneren Kräften bei dem Körper, welcher zersetzt wird, nicht von äusseren, wie man dafür halten sollte, wenn sie unmittelbar auf den Polen beruhten. Ich setze voraus, dass die Wirkung von einer, von der Elektricität verursachten Modification in den chemischen Verwandtschaften bei den Partikeln herrühren, welche Modification darin besteht, dass die chemische Verwandtschaft stärker nach der einen, als nach der anderen Seite wirkt, und sie (die Partikel) dadurch zwingt, durch eine neue Reihe von neuen Vereinigungen und neuen Trennungen in entgegengesetzter Richtung zu gehen, und zuletzt an der Grenze des in Zersetzung befindlichen Körpers ihre Expulsion verursacht." Dieser Ausdruck, der Strom ist eine Achse der Kraft, stimmt ganz in den späteren Anschauungskreis Faraday's von dem Wesen der Kraft. Die Kraft ist nichts, was zwischen zwei entfernten Raumpunkten unvermittelt wirkt, sondern der ganze Zwischenraum zwischen jenen Punkten ist bei der Kraftwirkung so betheiligt, dass jeder Punkt desselben empfangend und gebend oder vermittelnd thätig ist. Die Achse der Kraft ist principiell dasselbe, was später mit Kraftlinie bezeichnet wird. Dort werden wir näher von den Vortheilen und Unvollkommenheiten dieser Anschauung zu reden haben.

Faraday kam es nun vor Allem auch darauf an, Elektricität und chemische Kraft auch der Grösse nach zu vergleichen. Er schaltete

Faraday, elektrische Untersuchungen c. 1830 bis c. 1850.

in einen und denselben Strom hinter einander mehrere Wasserzersetzungszellen von sehr verschiedener Beschaffenheit ein. Da sich in allen diesen die gleiche Menge Wasserstoff entwickelte, kam er zu dem Schluss: Wird Wasser dem Einfluss des elektrischen Stromes ausgesetzt, so wird stets eine Portion davon zersetzt, deren Menge der Quantität von Elektricität proportional ist, ohne dass ein Einfluss auf diese Menge ausgeübt wird von der Intensität des elektrischen Stromes, oder von der in die Flüssigkeit eingesenkten grösseren oder geringeren Oberfläche, oder im Uebrigen von dem grösseren oder geringeren Leitungsvermögen der Flüssigkeit. Danach ist die Menge des erzeugten Gases ein genaues Maass für die Quantität der Elektricität, und Faraday construirte direct seinen Wasserzersetzungsapparat mit graduirten Glasröhren als Volta-Elektrometer oder kurz Voltameter. Um die Einwirkung des Stromes auf verschiedene Stoffe quantitativ vergleichen zu können, schaltete Faraday in denselben Strom sein Voltameter und eine Zersetzungszelle, die mit geschmolzenem Zinn- oder auch Bleichlorid gefüllt war, hinter einander ein. Er fand so z. B., dass auf 0,49742 Gran Gas im Voltameter 3,2 Gran Zinn, oder auf 1 Gran Wasserstoff 57,9 Gran Zinn erzeugt wurden. Da diese Zahlen Aequivalentzahlen der betreffenden Elemente sind, so kam Faraday zu seinem berühmten elektrolytischen Grundgesetz, das er durch zahlreiche weitere Versuche bestätigte: Bei gleichen Quantitäten Elektricität werden von verschiedenen Elektrolyten äquivalente Mengen zerlegt. Faraday's Widerwille gegen die seiner Meinung nach unpassenden Namen von elektrischen Polen und polaren Anziehungen führte ihn zu einer neuen Nomenclatur der elektrischen Zersetzung, der man zuerst wenig Beachtung schenkte, die aber in neuester Zeit immer mehr Anwendung findet. Danach heisst der ganze Vorgang der elektrochemischen Zersetzung nun Elektrolyse (von λύω auflösen), die durch den elektrischen Strom zersetzbaren Substanzen heissen Elektrolyten. Die Flächen, durch welche die Elektricität in die Flüssigkeiten tritt, werden Elektroden (ὁδός der Weg), diejenige, an der sich der Sauerstoff entwickelt, Anode (ἀνά aufwärts), die andere Kathode (κατά abwärts), die Zersetzungsproducte selbst werden Jonen (richtiger Jonten, von εἶμι gehen), und zwar dem Vorigen entsprechend Anion und Kation genannt [1]). Berzelius [2]) fand diese Nomenclatur darum sehr überflüssig, weil sie auf der Annahme nur einer Art von Elektricität basire, wo doch eben durch das elektro-chemische System die Realität zweier elektrischer Flüssigkeiten zweifellos geworden sei.

Alle diese Untersuchungen aber mussten Faraday nothwendig in den damals gerade in voller Heftigkeit wüthenden Streit zwischen

[1]) Phil. Trans. 1834, p. 78 bis 79.

[2]) Jahresber. über die Fortschr. der Physik und Chemie XV, S. 39, 1835.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

der Contacttheorie und der chemischen Theorie der Volta'schen Apparate verflechten. Ein gewissenhafter, ernsthafter Physiker, wie Faraday, konnte nicht umhin sich persönlich darüber zu entscheiden, ob die Elektricität in der Säule nur von dem Contact der Metalle oder nur von den chemischen Vorgängen zwischen den Metallen und den Flüssigkeiten — oder ob sie vielleicht von beiden herrühre, und wenn das letztere der Fall, welches dann am meisten zur Bildung des Stromes beitrage und welches Moment, der Contact oder die chemische Affinität, zuerst die Wirkung anhebe. Alle diese Fragen nämlich spielten in jenem Streit mit, und nur durch eine immerwährende Mischung derselben konnte überhaupt der Streit zu seiner Blüthe gedeihen und ein so langes Leben fristen.

Ein reiner Contacttheoretiker war vielleicht einzig Volta gewesen, der die Flüssigkeiten der Säule nur als passive Leiter der Elektricität ansah. Gleich nach ihm machten Fabbroni, Wollaston, Ritter u. A. darauf aufmerksam, dass diese Passivität der Flüssigkeiten in Wirklichkeit nicht stattfände, dass die Flüssigkeiten auf die Metalle immer chemisch einwirkten, und dass in diesen Vorgängen die Quelle der Elektricität zu suchen sei. Eine rein chemische Theorie der Säule stellte dann Parrot[1]) auf, während Pfaff[2]) durch viele Arbeiten die reine Contacttheorie Volta's möglichst zu stützen suchte. Bis zu dem Anfang der zwanziger Jahre blieb auch der Streit in würdigen Grenzen und behielt auf beiden Seiten den Charakter einer wissenschaftlichen Untersuchung und eines reinen Kampfes um die Wahrheit. Nachdem aber Berzelius sein chemisches System auf die Ansicht gegründet, dass alle chemischen Kräfte nur elektrische Anziehungen und Abstossungen der verschieden elektrischen Elemente seien, nachdem er also die Ursprünglichkeit der elektrischen Kräfte gegenüber den chemischen als Fundament seiner Theorien genommen, und nachdem die meisten Chemiker und Physiker, vor Allem die Deutschen diese Ansicht zu der ihrigen gemacht, erhielt der Streit einen anderen Charakter. Den gewaltigen, durch geistige Kraft, wie durch zahlreiche Arbeiten wohl begründeten Angriffen Aug. de la Rive's[3]) und später Becquerel's[4]) gegenüber

---

[1]) Uebersicht und System der theoretischen Physik, Dorpat 1809 u. 1811.

[2]) Christian Heinrich Pfaff (2. März 1773 Stuttgart — 23. April 1852 Kiel), studirte Medicin und war auch einige Zeit als praktischer Arzt thätig, wurde aber schon 1797 ausserordentlicher und 1801 ordentlicher Professor der Medicin, Physik und Chemie in Kiel, wo er bis zu seinem Tode blieb.

[3]) Auguste Arthur de la Rive (Sohn von Charles Gaspard de la Rive, 1770 — 1834, Prof. der Chemie in Genf), geboren am 9. October 1801 in Genf, war seit 1823 Prof. der Physik daselbst, redigirte von 1836 an die Bibliothèque universelle, danach die Archives de l'électricité und dann mit Marignac die Archives des sciences physiques et naturelles. Er starb am 27. Nov. 1873 in Genf.

[4]) Antoine César Becquerel (8. März 1788 Châtillon-sur-Loing — 18. Jan. 1878 Paris), Prof. am Musée d'Histoire naturelle in Paris.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

schien nun nicht mehr eine fragliche elektrische Theorie, sondern ein ganz wissenschaftliches System gegenüber zu stehen. Der Kampf erhielt danach mehr das Ansehen eines Kampfes um die Macht, als um die Wahrheit, und bald verstanden die Gegner einander nicht mehr und fochten mehr gegen Ansichten, welche sie dem Gegner imputirten, als gegen solche, welche der Gegner wirklich vertheidigte[1]). Was Berzelius[2]) von dem Verfahren seiner Gegner sagt, gilt in ganz gleicher Weise auch für ihn und seine Partei. „Eine solche Behandlung von wichtigen Punkten in den Grundlehren der Wissenschaft erfolgt immer, wenn man nicht zu erforschen sucht, was ist, sondern nur Beweise sucht für eine Meinung, auf die man gefallen ist und die man durchaus zur Wahrheit machen will. Ein allerdings sehr gewöhnliches Verhalten, welches aber, durch Beiseitesetzung der unparteiischen Prüfung den Forscher öfter irre führt, als man vermuthet." „Solche Erklärungen gleichen ungefähr dem Verfahren von denen, welche die Hand vor die Augen halten, um nicht das zu sehen, von dem sie nicht wollen, dass es sein soll, wie es ist."

Bald nach der Erfindung der sogenannten Zamboni'schen oder trockenen Säulen[3]) hatte es geschienen, als sollte durch sie die Contacttheorie gänzlich siegen. Doch zeigte sich bald, dass auch in diesen Säulen chemische Veränderungen wirksam sind und dass auch in diesen die Stärke des Stromes mit der Stärke der chemischen Action wächst, die vor Allem von der atmosphärischen Feuchtigkeit und den hygroskopischen Kräften der Substanzen in der Säule abhängt[4]). Später, nachdem de la Rive gezeigt hatte, dass der elektrische Strom bei denselben Metallen nur durch Anwendung verschiedener Flüssigkeiten, ja nur verschieden verdünnter Säuren umgekehrt werden könne, als man auch aus nur einem Metall und zwei Flüssigkeiten, ja nur aus Flüssigkeiten Ströme erhielt[5]), da schien wieder die chemische Theorie des

[1]) Joh. Müller, Bericht über die neuesten Fortschr. d. Phys. I, S. 227 (Braunschweig 1849 — 1852): „Ein Umstand, welcher bei diesem Streite besonders auffallen muss, und der nicht wenig zur Verlängerung desselben und zur Verwirrung beigetragen hat, ist der, dass so häufig die gegnerische Meinung ganz unrichtig aufgefasst wurde, dass man sie gleichsam zur Carricatur machte. Auf diese Weise wurden dem Gegner Behauptungen untergelegt, die er nie gemacht hatte; es wurden aus seiner Theorie Consequenzen gezogen, gegen die er protestiren musste."

[2]) Jahresbericht XVIII, S. 52 u. 54, 1838.

[3]) Trockene Säulen von kräftigerer Wirkung wurden nach mancherlei früheren schwächeren Versuchen (Georg Bernhard Behrens 1806, Jean André Deluc 1810) von Gius. Zamboni (1776 — 1846; Prof. d. Phys. am Lyceum in Verona; Della pila elettrica a secco, Verona 1812) im Jahre 1812 aus Silberpapier, das auf der Papierseite mit pulverisirtem Braunstein überzogen war, aufgebaut. Bohnenberger benutzte (1815) an einander geleimte Blättchen aus Gold- und Silberpapier mit noch grösserem Erfolge.

[4]) Pfaff schlug im Jahre 1834 die trockene Säule geradezu als Hygrometer vor.

[5]) Aug. de la Rive: Analyse de circonstances qui déterminent le sens et l'intensité du courant électr. dans un élém. voltaïque

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1380 bis c. 1850.

Stromes in überwiegendem Vortheil zu sein. Zwar parirten die Anhänger der Contacttheorie diesen Stoss, indem sie zugaben, dass auch durch die Berührung von Metallen und Flüssigkeiten, oder gar von Flüssigkeiten unter sich, die Elektricitäten, vielleicht noch stärker als beim Contact von Metallen, vertheilt würden [1]). Nach und nach aber erstarkte, trotz der Einwände von Berzelius, Pfaff, Poggendorff und Fechner, die chemische Theorie in sich selbst immer mehr, und Faraday's Gesetz über die Proportionalität der Quantität der Elektricität und der chemischen Zersetzungsproducte zeigte jedenfalls die genaue ursächliche Verwandtschaft beider Kräfte. Faraday stellte sich denn auch in der Abhandlung über die Elektricität der Volta'schen Säule [2]) ganz auf den Boden der chemischen Theorie und versuchte durch vielfältige Versuche nachzuweisen, dass nur die in der Säule vor sich gehenden chemischen Processe als Ursachen des Stromes angesehen werden könnten. In der Abhandlung vom Jahre 1840 [3]) aber machte er den stärksten Grund geltend, den man gegen eine reine Contacttheorie anführen kann. „Die Contacttheorie," sagt er, „nimmt an, dass eine Kraft, welche im Stande ist, einen mächtigen Widerstand zu überwinden, wie z. B. den der guten und schlechten Leiter, durch welche der Strom hindurchgeht, und ferner den der elektrolytischen Wirkung, wobei Körper zersetzt werden, — dass eine solche Kraft aus Nichts entstehen könne; ferner, dass ohne irgend einen Wechsel in der wirkenden Substanz und ohne den Verbrauch von irgend einer Triebkraft ein Strom gebildet werde, welcher fortwährend gegen einen constanten Widerstand andauere, oder nur wie in den Volta'schen Zersetzungszellen durch die Trümmer gehemmt werden könne, welche er auf seinem eigenen Lauf aufgehäuft hat. Es wäre dies in der That eine Erschaffung einer Triebkraft aus Nichts und verschieden von jeder anderen Naturkraft. Es giebt mancherlei Vorgänge, wobei die Erscheinungsform der Kraft sich dermaassen verändern kann, dass eine scheinbare Umwandlung von einer Kraft in die andere stattfindet. Auf diese Weise können wir chemische Kräfte in einen elektrischen Strom, oder diesen in chemische Kraft verwandeln. Die schönen Versuche von Seebeck und Peltier zeigen den gegenseitigen Uebergang von Wärme und Elektricität, und andere von Oersted und mir angestellte Experimente zeigen die gegenseitige Verwandlungsfähigkeit von Elektricität und Magnetismus. Allein in keinem Falle, nicht einmal bei dem elektrischen Aale und Rochen, findet eine Erschaffung oder Erzeugung von Kraft statt ohne

---

Ann. de chim. et de phys. (2) XXXVII, 1828; Rech. sur la cause de l'électr. volt., Ann. de chim. et de phys. (2) XXXIX, 1828; u. s. w.

[1]) Berzelius, Jahresber. IX, 1829.

[2]) Exp. res., Ser. VIII: Electricity of the voltaic pile, Phil. Trans. 1834; Pogg. Ann. XXXV, 1835.

[3]) Exp. res., Ser. XVI u. XVII: On the source of power in the voltaic pile, Phil. Trans. 1840; Pogg. Ann. LII u. LIII, 1841.

einen entsprechenden Verbrauch von etwas Anderem." Mit dem Siege dieser Anschauung wurden die Contacttheoretiker ganz auf die Thatsache zurückgedrängt, dass sich auch bei nicht geschlossenen Ketten, in denen noch keinerlei chemische Veränderung vor sich geht, doch schon eine gewisse Spannung zeigt. Nach dieser Beschränkung der Ansprüche aber war dann eine Vermittelung zwischen den streitenden Parteien möglich. Sie erfolgte vorzüglich durch Schönbein, den berühmten Entdecker des Ozons, in den vierziger Jahren dieses Jahrhunderts. Nach vielen Arbeiten kam dieser zu der endlichen Ansicht, dass der Contact der Stoffe in der Volta'schen Batterie die erste elektrische Vertheilung, die erste Spannung erzeugt, dass dadurch die chemische Thätigkeit in der Batterie angeregt, und dass diese dann in ihrer Fortsetzung zur immer sprudelnden Quelle des elektrischen Stromes wird [1]). Auf denselben Anschauungen ruht auch die Theorie der galvanischen Kette, welche Helmholtz in seiner berühmten Abhandlung „Ueber die Erhaltung der Kraft" (Berlin 1847) auseinander setzte [2]), und darnach haben sich die Physiker ganz allgemein dieser Theorie angeschlossen [3]).

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

Der Streit um die Theorie der galvanischen Kette hatte natürlich bei allen bösen Folgen auch seine guten Seiten. Zu den letzteren ist an erster Stelle die durch jenen Streit hervorgerufene intensive Beschäftigung mit den inneren Vorgängen in der Batterie, mit den chemischen Veränderungen in derselben zu rechnen. Es ist in dieser Beziehung sehr charakteristisch, dass der eifrige Anhänger der Contacttheorie Fechner die schnelle Abnahme der Wirkung einer geschlossenen Kette durch einen besonderen Uebergangswiderstand erklärte, welchen die Elektricität beim Uebergange aus einem Metall in eine Flüssigkeit und umgekehrt findet. Ein Widerstand, der besonders an dem elektronegativen Metall durch eine gewisse Polarisation desselben wachsen und nach dem Oeffnen der Kette mit dem Aufhören dieser Polarisation sich

---

[1]) Schönbein's hierhergehörige Abhandlungen finden sich in Poggendorff's Annalen von 1836 an bis 1849, abschliessend im letzteren Jahre im LXXVIII. Bde., S. 289, mit der Abhandlung „Ueber die chemische Theorie der Volta'schen Säule". Christian Friedr. Schönbein (18. Octob. 1799 Metzingen, Würtemberg — 30. August 1868 Baden-Baden), trat 1813 in eine chemische Fabrik ein, studirte dann Naturwissenschaften, war 1824 und 1825 Lehrer in Keilhau bei Rudolstadt und wurde 1828 (nach einer wissenschaftlichen Reise in England und Frankreich) Professor der Chemie in Basel, wo er bis zu seinem Tode thätig war.

[2]) Helmholtz, Wissenschaftliche Abhandlungen I, S. 46, Leipzig 1882.

[3]) Eine specielle Anführung auch nur der Hauptarbeiten aus jenem Kampfe der Theorien ist schon des Raumes wegen nicht möglich. Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie, die Annales de chimie et de physique sind in den zwanziger und dreissiger Jahren d. Jahrh. damit angefüllt; Berzelius' Jahresberichte über die Fortschritte der Physik und Chemie geben ein lebhaftes, aber einseitig gefärbtes Bild des Streites.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

wieder vermindern sollte [1]). Währenddem auf der anderen Seite die Anhänger der chemischen Theorie nicht bloss zu einer besseren Einsicht in das Wesen jener Wirkungsabnahme, sondern auch zur ersten Construction constanter Ketten kommen konnten. Der Erste, welcher ein sogenanntes constantes Element construirte, war Becquerel [2]) im Jahre 1829; ihm folgte 1836 Daniell mit grösserem Erfolge. Grove kam zu seinem Platinelement im Jahre 1840. Die beiden Letzteren waren bei ihren Constructionen entschieden von der Ansicht ausgegangen, dass die Abnahme der galvanischen Wirkungen in der Kette von den Zersetzungsproducten herrühre, die während der Schliessung der Kette in derselben erzeugt würden, sich auf den betreffenden Metallen ablagerten und vor Allem an dem negativen Metalle schädlich wirkten. Daniell machte diese Ablagerungen unschädlich, indem er das Kupfer in Kupfervitriol stellte, wonach sich auf denselben nicht Wasserstoff, sondern wieder Kupfer ablagerte. Grove erreichte denselben Zweck, indem er das Platin in Salpetersäure tauchte, die den entstehenden Wasserstoff immerwährend oxydirt. Doch war man zuerst über die Rolle, welche die Zersetzungsproducte in der Zelle spielen, noch nicht klar und führte ihre stromschwächende Kraft meist auf die Vergrösserung des Widerstandes der Kette gegen die Stromleitung zurück. Einer der ersten, welcher die Wirkung dieser Zersetzungsproducte genauer bestimmte, war Schönbein [3]). Auf frühere Beobachtungen von Ritter, Marianini (1816) u. A. fussend, behauptete er, dass gerade wie in einer Ritter'schen secundären Batterie, auch in den galvanischen Elementen selbst die Platten polarisirt würden, so dass sie durch diese Polarisation allein einen Strom ergeben müssten, der dem Batteriestrom entgegengesetzt wäre. Diese Polarisation aber führte er auf die an den Metallplatten haftenden Gase zurück, die auch ihrerseits wie Flüssigkeiten oder Metalle durch ihre Contactwirkung elektrische Spannung erzeugen könnten [4]). Die Theorie der galvanischen Polarisation haben dann meist im Schönbein'schen Sinne Poggendorff [5]), Beetz [6]) u. A. weiter entwickelt.

In der Reihe der Experimental Researches von Faraday tritt nach dem Jahre 1835 eine mehrjährige Pause ein, die aber desto mehr

---

[1]) Fechner, Maassbestimmungen der galvanischen Kette, Leipzig 1831.

[2]) Wie schon angedeutet, war A. C. Becquerel neben De la Rive der eifrigste und geschickteste Vertheidiger der chemischen Theorie der Volta'schen Kette.

[3]) Elektrische Polarisation fester und flüssiger Körper. Pogg. Ann. XLVI, S. 109 u. XLVII, S. 101, 1839 ff.

[4]) Vergl. Müller, Bericht über die neuesten Fortschritte I, S. 336 bis 374, Braunschweig 1849 bis 1852.

[5]) Pogg. Ann. LXI, S. 586, 1844.

[6]) Ibid. LXXVIII, S. 35, 1849.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

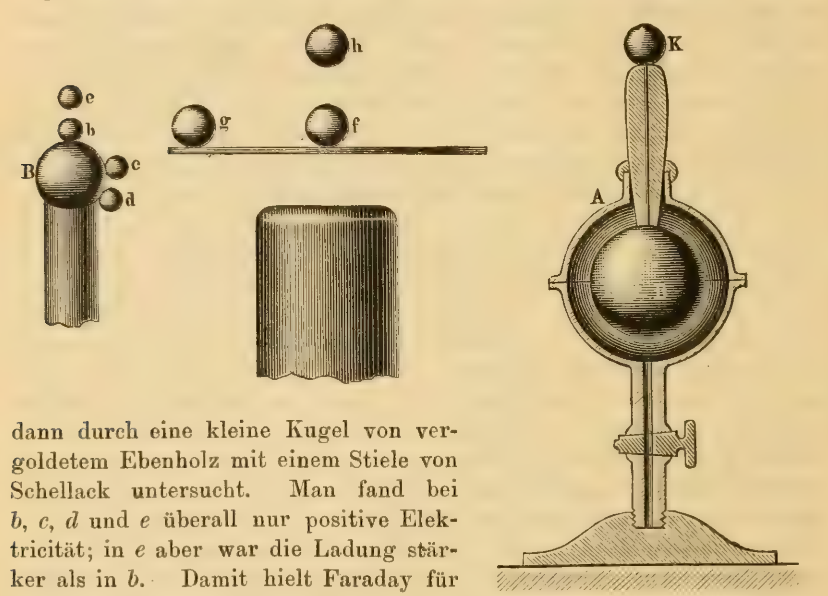
durch innere Geistesarbeit ausgefüllt erscheint, so sehr, dass die Arbeiten vorher und nachher sich wie die Arbeiten zweier Perioden unterscheiden. Die ersteren schienen beherrscht durch das Experiment, durch das Interesse am Thatsächlichen. Faraday aber war viel zu tief beanlagt, um beim Aeusseren stehen zu bleiben, um nicht mit aller Kraft dem Wesen der Sache zuzustreben. Die zeitgenössische Physik nahm die Ursachen der Erscheinungen für Kräfte, welche direct und unmittelbar zwischen den Körpern durch alle Entfernung hin wirkten. Die Wirkungsart dieser Kräfte und ihre Wirkungsgrösse auf einen bestimmten Punkt war anschaulich unfassbar, sie war in voller Strenge nur mathematisch zu fassen. Faraday jedoch war nie in die Geheimnisse der Mathematik eingedrungen, auch war er eine entschieden intuitive Natur, die sich selbst bei voller mathematischer Ausbildung kaum mit einer Formel als Ausdruck für das Wesen der Erscheinung begnügt hätte. So konnte Faraday nicht anders als jede actio in distans nur als ein scheinbares Phänomen betrachten und hinter jeder beobachteten Wirkung in die Ferne eine natürliche Vermittelung desselben suchen [1]). Die Schwere liess er dabei, trotz seiner Zweifel, zuerst noch ausser Spiel und bemühte sich nur, die elektrischen und magnetischen Kräfte auf ihre Fernwirkungen zu untersuchen und diese Kräfte, wenn möglich, von der Schwere generell zu trennen. Dafür schien aber zuerst nicht die neu entdeckte dynamische Induction, sondern mehr die statische Induction, wie Faraday sie bezeichnete, oder die Influenz der Reibungselektricität geeignet. Von dieser Seite gesehen, begreift man die folgenden Worte Faraday's: „Unter den Wirkungen verschiedener Art, in welche man die Elektricität eintheilt, giebt es keine meiner Meinung nach, welche an Wichtigkeit diejenige, welche wir Induction nennen, überträfe oder ihr nur vergleichbar wäre. Diese hat den ausgedehntesten Einfluss auf die Erscheinungen der Elektricität, da es scheint, dass sie an Allem Theil nimmt, und sie hat ganz den Charakter eines Grundprincips. Ihre richtige Auffassung ist so wichtig, dass wir, wie mir scheint, in unseren Untersuchungen über

[1]) Helmholtz sagt in der Vorrede (S. IX) zu der Uebersetzung von Faraday und seine Entdeckungen (Braunschweig 1870): „Nachdem unsere Zeit in ihrem wohlberechtigten Streben, das menschliche Wissen vor allen Dingen zum treuen Abbilde der Wirklichkeit zu machen, viele alte metaphysische Götzenbilder zerschlagen hatte, blieb sie stehen vor den überlieferten Formen der physikalischen Begriffe der Materie, der Kraft, der Imponderabilien, ja diese Namen wurden zum Theil die neuen metaphysischen Stichworte Derer, die sich am meisten in der Aufklärung vorgeschritten zu sein dünkten. Diese Begriffe nun sind es, die Faraday in seinen reiferen Arbeiten immer und immer wieder von Allem zu reinigen sucht, was sie Theoretisches enthalten, und was nicht unmittelbarer und reiner Ausdruck der Thatsachen ist“.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

das Gesetz der Elektricität keine Fortschritte machen können, wenn wir uns nicht vorher mit ihrer Natur genau bekannt gemacht haben.“

Faraday hält dafür, dass jede actio in distans in geradliniger Verbreitung gedacht werden müsse, während eine vermittelte Kraftwirkung auch krummlinig durch den Raum sich ausbreiten könne; er bemüht sich darum zu zeigen, dass bei der elektrischen Influenz dies letztere der Fall sei. Faraday machte durch Reiben mit warmem Flanell einen Schellackcylinder von 0,9 Zoll Durchmesser und 7 Zoll Länge negativ elektrisch und legte eine Messingkugel *B*, von 1 Zoll Durchmesser, wie nebenstehende Figur zeigt, auf dieses Ende. Die durch Induction entstehende Ladung wurde




dann durch eine kleine Kugel von vergoldetem Ebenholz mit einem Stiele von Schellack untersucht. Man fand bei *b*, *c*, *d* und *e* überall nur positive Elektricität; in *e* aber war die Ladung stärker als in *b*. Damit hielt Faraday für bewiesen, dass die statische Induction in krummen Linien um die Kugel herum wirke, denn dass durch einen Leiter hindurch keine Induction stattfinde, nahm er nach dem folgenden Versuche für sicher an. Hielt man nämlich, wie unsere andere Figur angiebt, statt der Kugel eine runde Metallscheibe von $1\frac{1}{2}$ bis 2 Zoll Durchmesser über dem geriebenen Schellackcylinder, so erhielt die Probekugel keine Ladung bei *f*, während bei *g* und bei *h* eine Ladung entstand. Aehnliche Versuche wurden auch mit Halbkugeln angestellt und ergaben entsprechende Resultate. Danach sah Faraday für sicher an, dass die elektrische Influenz keine actio in distans sei, dass sie vielmehr durch Vermittelung der zwischenliegenden Materien geschehe, und damit ging er dazu über, die Einflüsse dieser Zwischensubstanzen auf das Wesen der elektrischen

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

Influenz näher zu studiren. Zu dem Zwecke bediente er sich zwei vollkommen gleicher Instrumente, deren jedes der Hauptsache nach aus zwei concentrischen, metallenen Hohlkugeln bestand (siehe die letzte der nebenstehenden Figuren). Die äussere Hohlkugel war, ähnlich den Magdeburger Halbkugeln, aus zwei trennbaren Theilen zusammengesetzt; die innere Hohlkugel hing an einem Draht, der, mit einem Schellackcylinder umschlossen, isolirt und luftdicht schliessend durch eine Oeffnung in der äusseren Kugel ging, und oben in einer kleineren, massiven Metallkugel endigte. Von der unteren Hälfte der äusseren Kugel führte durch den metallenen Fuss des Apparates ein mit einem Hahn verschliessbarer Canal nach aussen, durch welchen der Zwischenraum zwischen den Kugeln luftleer gemacht, oder mit verschiedenen Gasen gefüllt werden konnte; auch wurde bei verschiedenen Versuchen die untere Hälfte des Zwischenraumes mit festen Substanzen, wie Schwefel, Schellack u. s. w. ausgegossen. Diese Apparate, welche Faraday Vertheilungsapparate nannte, waren also dem Princip nach Leydener Flaschen, bei denen nur die isolirende Substanz gewechselt und sogar durch Luftschichten ersetzt werden konnte. Faraday lud immer zuerst den einen Apparat, theilte diese Ladung zwischen den beiden Apparaten und untersuchte dann mit Hülfe eines Probescheibchens und der Coulomb'schen Drehwage die nun auf jedem Apparat vorhandenen Ladungen. Waren beide Apparate in gleichem Zustande, so halbirte sich bei jeder Theilung die Ladung. War aber der erste Apparat mit atmosphärischer Luft gefüllt, der zweite zur Hälfte mit Schellack ausgegossen, so fand Faraday bei einer Ladung der Luftflasche, welche 290 Graden der Drehwage proportional war, nach der Theilung auf jeder der inneren Kugeln zwar die gleiche Ladung, aber nur proportional einer Grösse von 114 Grad. Der scheinbare Verlust an Elektricität konnte nur von einer Bindung derselben durch die Schellacklage des zweiten Apparates oder vielmehr von einer stärkeren bindenden Kraft dieser Substanz als der Luft herrühren. Da nun Versuche diese Verschiedenheit der Elektricität bindenden Kraft, des specifischen Inductionsvermögens[1]), wie Faraday sie nannte, für verschiedene Substanzen bestätigte, so schloss Faraday wieder, dass die elektrische Influenz von dem Medium abhängig, und also auch darum keine unvermittelte Fernwirkung sein könne. Faraday nannte solche Substanzen, durch welche hindurch eine Influenz stattfinden kann, Dielectrica. Der Name deckt sich im Grunde genommen mit dem Begriff Isolatoren, doch suchte Faraday nachzuweisen.

---

[1]) Aus dem angeführten Versuche erhält man leicht für das specifische Inductionsvermögen (die Dielektricitätsconstante $D$) des Schellacks bezogen auf Luft $D = \frac{176}{114} = 1,5$, oder, wenn man bedenkt, dass nur die Hälfte der isolirenden Substanz aus Schellack bestand, $D = 2$. Für Wallrath erhielt Faraday $D = 1,3$ bis $1,6$; für Glas $D = 2,2$; für Schwefel $D = 2,24$; für alle Gase war $D$ constant.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

dass Leiter und Nichtleiter nicht absolut, sondern nur graduell von einander verschieden wären. Dazu dient ihm die Untersuchung der elektrischen Entladung. Mit den Eigenschaften der letzteren beschäftigt sich Faraday in der 12. und 13. Reihe seiner Experimentaluntersuchungen, während die vorher erwähnten Untersuchungen das Thema der 11. Reihe bildeten [1]).

Auch die Entladung der Elektricität ist von dem Dielektricum abhängig. Die Schlagweite der Elektricität war verschieden, je nach der Art der Gase, durch welche die Entladung geschah; die Farbe des Entladungslichtes wurde durch die Gase modificirt, und auch die Art der Entladung, ob dieselbe in Funken, Büscheln oder durch Glimmen vor sich ging, war bedingt durch die verschiedenen Dielectrica. Besonders merkwürdig aber erschien ein Umstand, den Faraday unter dem Namen der dunklen Entladung beschrieb. „Zwei Messingstäbe von 0,3″ Dicke waren von den gegenüberliegenden Seiten her in eine Glaskugel eingelassen und mit ihren Enden in Berührung gebracht; auch war die Luft um ihnen stark verdünnt. Nun wurde eine elektrische Entladung aus der Maschine durch sie hindurch geleitet, und während diese fortfuhr, wurden die Enden von einander getrennt. Im Moment der Trennung erschien auf dem Ende des negativen Stabes ein andauerndes Glimmen, während das positive Ende ganz dunkel blieb. Bei Vergrösserung der Entfernung erschien ein purpurfarbener Streif oder Nebel auf dem Ende des positiven Stabes, und schritt auswärts direct auf den negativen Stab los; er verlängerte sich bei Vergrösserung des Zwischenraumes, vereinigte sich aber niemals mit dem negativen Glimmen, indem immer ein kurzer dunkler Raum dazwischen blieb. Dieser Raum von etwa $1/_{16}$ bis $1/_{20}$ Zoll war anscheinend unveränderlich in Ausdehnung und Lage, in Bezug auf den negativen Stab. . . . Das Verständniss dieser Erscheinungen würde sehr wichtig sein, denn es ist ganz klar, dass bei vielen Versuchen . . . die Entladung durch den dunklen Theil des Dielektricums in einer Ausdehnung stattfindet, die der in dem leuchtenden völlig gleich ist. Dieser Unterschied in dem Resultat (der positiven und negativen Entladung) scheint eine Verschiedenheit in der Art, wie die beiden elektrischen Kräfte in den respectiven Theilen ins Gleichgewicht gebracht werden, anzuzeigen; und hält man diese Erscheinungen für fernere Beweise, dass wir die Principien der Vertheilung und Entladung in dem Zustande der Theilchen des Dielektricums suchen müssen, so wird es von grosser Wich-

[1]) Exp. res., Ser. XI: On static induction; differential inductometer, Phil. Trans. 1838; Pogg. Ann. XLVI, 1838. Ser. XII: On static induction continued, Phil. Trans. 1838; Pogg. Ann. XLVII, 1839. Ser. XIII: On static induction continued; nature of the electric current; its transverse forces, Phil. Trans. 1838; Pogg. Ann. XLVIII, 1839.

tigkeit sein, genau zu wissen, worin der Unterschied der action in den dunklen und leuchtenden Theilen besteht“ [1]). Ueberhaupt erwartet Faraday, wie wir denken mit Recht, grosse Dinge von der Beobachtung der Entladungserscheinungen. „Die mit den verschiedenen Umständen der positiven und negativen Entladung zusammenhängenden Resultate,“ sagt er an einer anderen Stelle, „werden auf die Theorie der Elektricitätslehre einen weit grösseren Einfluss haben, als wir uns gegenwärtig einbilden, besonders wenn sie, wie ich glaube, von der Eigenthümlichkeit und dem Grade des von den Theilchen des betreffenden Dielektricums erlangten Polarisationszustandes abhängen“ [2]).

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

Danach aber hebt Faraday den Unterschied zwischen Leitern und Isolatoren, wie zwischen Entladung und Leitung der Elektricität im Princip auf, indem er jede Leitung ebenfalls als Entladung zwischen den angrenzenden Theilen von Körpern auffasst, die nur bei einigen Substanzen sehr schnell, bei anderen aber sehr langsam vor sich geht. Trotzdem aber ist der Unterschied zwischen Leitern und Isolatoren auch bei Faraday „ein sehr wichtiger Punkt, da er wesentlich zusammenhängt mit der Moleculartheorie der Vertheilung und der Weise, wie Körpertheilchen jenen Polarisationszustand annehmen und bewahren“ [3]). Die Ladung eines Körpers aber hängt ganz genau mit der Vertheilung der Elektricität zusammen und die Ausdrücke freie Ladung und gebundene Elektricität führen nur zu irrigen Begriffen, wenn damit irgend ein Unterschied in der Art und Weise der Wirkung bezeichnet werden soll. „Die Ladung auf dem isolirten Leiter in der Mitte eines Zimmers steht zu den Wänden dieses Zimmers in derselben Beziehung, wie die Ladung auf dem inneren Belege einer Leydener Flasche zu dem äusseren Belege derselben Flasche. Die eine ist nicht freier oder gebundener als die andere [4]).“

Faraday's Bemerkungen über die Influenz fanden nicht die ungetheilt günstige Aufnahme, wie seine früheren Untersuchungen. Die meisten Physiker, und hauptsächlich die deutschen, waren mit seiner Gegnerschaft gegen die actio in distans durchaus nicht einverstanden. Riess [5]) vor Allen, der

[1]) Pogg. Ann. XLVIII, S. 430 bis 432, 1839.

[2]) Ibid. XLVIII, S. 286, 1839.

[3]) Ibid. XLVIII, S. 461, 1839.

[4]) Ibid. Ergänzungsband I, S. 254, 1839. In dem älteren Streite darüber, ob die gebundene Elektricität der Wirkung nach aussen noch fähig sei oder nicht, stand Faraday natürlich auf der ersteren Seite, da er freie Elektricität im eigentlichen Sinne nicht anerkannte. Den Ausdruck „gebundene oder latente Elektricität“ hat Lichtenberg (Erxleben, Anfangsgründe der Naturlehre, mit Zusätzen von Lichtenberg, 3. Aufl., 1784) in Anlehnung an den Ausdruck gebundene Wärme eingeführt. Riess schlug dafür (Pogg. Ann. LXXIII, S. 367, 1848) der falschen Vorstellung wegen, die der Ausdruck hervorruft, den Namen Influenzelektricität vor.

[5]) Peter Theophil Riess (27. Juni 1805 Berlin — 22. October 1883 Berlin), Professor der Physik an der Universität, auch Mitglied der Akademie in Berlin.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

die Reibungselektricität zu seinem speciellen Studium machte und die seit 1834 veröffentlichten Aufsätze 1853 in seinem grossen Werke „die Lehre von der Reibungselektricität" sammelte, bemühte sich zu zeigen, dass, wenn auch bei der Influenz eine Wirkung auf das Dielektricum nicht geläugnet werden könne, doch die unvermittelte Fernwirkung von Conductor zu Conductor die Hauptsache dabei sei. Ueber die mathematischen Gesetze der Entladung gab Riess um diese Zeit folgende Sätze: 1) Die Repulsion einer anliegenden Kugel durch die Innenseite einer elektrischen Batterie ist dem Quadrate der elektrischen Dichtigkeit proportional, bei einiger Entfernung aber nur der Dichtigkeit selbst; 2) die Schlagweite ist der Dichtigkeit der angehäuften Elektricität proportional; 3) die Temperaturerhöhung, welche durch eine Ausladung im Schliessungsdraht hervorgebracht wird, ist proportional dem Product der Quantität und der Dichtigkeit der Elektricität; 4) die Temperaturerhöhung in verschiedenen gleich langen Drähten desselben Metalls bei derselben Elektricität verhält sich umgekehrt wie die Biquadrate der Durchmesser; 5) die Ablenkung einer Magnetnadel durch den Draht, der eine Batterie langsam entladet, nimmt mit der Zunahme der Oberfläche einer Batterie ab[1]). Noch vor diesen Untersuchungen hatte Wheatstone[2]) sich mit der Entladung elektrischer Batterien beschäftigt und durch seinen bekannten Spiegelapparat die Dauer des Entladungsfunkens einer Batterie auf 0,000042 Sec., die dabei stattfindende Geschwindigkeit des Entladungsstromes zu 62 500 Meilen in der Secunde gemessen.

Faraday war also zu der Ansicht gekommen, dass alle Erscheinungen der statischen Elektricität auf unmittelbaren Wirkungen beruhen, und er meint diese Ansicht auf alle Polarkräfte ausdehnen zu können, „denn die eine Kraft findet oder entwickelt die entgegengesetzte Kraft nahe bei sich und hat daher keine Gelegenheit, sie in der Ferne zu suchen" [3]). Doch schliesst Faraday die Fernwirkung hier noch nicht absolut aus, vielmehr macht er ausdrücklich darauf aufmerksam, dass er unter angrenzenden Theilchen immer nur die verstehe, „welche einander am nächsten sind, nicht dass kein Raum zwischen ihnen sei" [4]). Auch kam er gleich darauf [5]) bei der Be-

---

[1]) Pogg. Ann. XL, S. 335, 1837.

[2]) Phil. Trans. p. 583, 1834. Pogg. Ann. XXXIV, S. 464, 1835. Charles Wheatstone (1802 Gloucester — 1880 London), zuerst Verfertiger musikalischer Instrumente, dann Professor der Physik am King's College in London, dann als Privatmann lebend.

[3]) Pogg. Ann. XLVIII, S. 538 bis 539, 1839.

[4]) Ibid. S. 538.

[5]) Exp. res., Ser. XIV: Nature of electric forces; relation of the electric and magnetic forces; Phil. Trans. 1838; Pogg. Ann. Ergänzungsband I, 1839.

trachtung der transversalen oder der magnetischen Kräfte des elektrischen Stromes zu wenig günstigen Resultaten. Seine Versuche schienen vielmehr zu beweisen, „dass, obwohl die Vertheilungskraft der statischen Elektricität vermöge der Wirkung intermediärer Theilchen in die Ferne geführt wird, doch die transversale Vertheilungskraft der Ströme, welche auch in die Ferne wirken können, nicht auf solche Weise durch intermediäre Theilchen fortgepflanzt wird“ [1]). Indessen hielt er selbst jene Versuche nicht für beweisend und entscheidend, und hielt es trotzdem „für möglich, ja selbst für wahrscheinlich, dass die magnetische Wirkung durch Vermittelung dazwischenliegender Theilchen in die Ferne fortgepflanzt wird“ [2]).

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

Damit war Faraday wieder an einen schweren, vielleicht den schwersten Punkt seiner Arbeit angekommen; seine Experimentaluntersuchungen brachen jetzt auf Jahre hinaus von diesem Thema ab. Er zeigte in Zwischenarbeiten, dass die Kraft der elektrischen Fische in allen Wirkungen identisch ist mit den aus anderen Quellen stammenden Elektricitäten [3]), beschäftigte sich, wie wir schon erwähnt, wieder mit der Theorie der galvanischen Elemente [4]) und untersuchte 1843 die vor kurzer Zeit entdeckte Dampfelektricität [5]). Im Jahre 1840 hatte ein Maschinenwärter in der Nähe von Newcastle on Tyne einen elektrischen Schlag verspürt, als er zufällig die eine Hand in den aus einer undichten Fuge eines Dampfkessels ausströmenden Dampf hielt, während er mit der anderen Hand den Hebel des Sicherheitsventils erfasste. Der Mechaniker Armstrong [6]), am Ende des Jahres 1840 hiervon benachrichtigt, zeigte danach, dass der aus dem Sicherheitsventil ausströmende Dampf einer Lokomotive immer positiv elektrisch ist, während der Dampfkessel, wenn derselbe isolirt wird, freie negative Elektricität hat. Armstrong selbst kam zu keinem Entscheid über die eigentliche Quelle der Elektricität. Faraday aber gelangte zu dem sicheren Resultat, dass diese Quelle vor Allem in der Reibung der Wassertheilchen des condensirten Dampfes an den Wänden des Ausflusscanals zu suchen sei.

Dass Faraday indessen, während dieser Abschweifungen von seinem Hauptthema, dieses selbst nicht aus den Augen verloren, sondern für

[1]) Pogg. Ann. Ergänzungsband I, S. 270 bis 271, 1839.

[2]) Ibid. S. 272.

[3]) Exp. res., Ser. XV: On the character and direction of the electric force of the Gymnotus, Phil. Trans. 1839; Pogg. Ann. Ergzbd. I, 1839.

[4]) Exp. res., Ser. XVI u. XVII: On the source of power in the voltaic pile, Phil. Trans. 1840; Pogg. Ann. LII u. LIII, 1841.

[5]) Exp. res., Ser. XVIII: On the electricity evolved by the friction of water and steam against other bodies, Phil. Trans. 1843; Pogg. Ann. LX, 1843.

[6]) Phil. Magazine (3) XVII u. XVIII, 1840; Pogg. Ann. LII, S. 328, 1841. Beschreibung einer Hydro-Elektrisirmaschine, Pogg. Ann. LX, S. 352, 1843.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

dasselbe sehr intensiv thätig gewesen war, das zeigten die vom Jahre 1846 an nachfolgenden Reihen seiner Experimentaluntersuchungen. Faraday's Ideen von einer vermittelten Fernwirkung aller polaren Kräfte bedingte, auf die magnetischen Kräfte angewandt, die Möglichkeit einer Magnetisation aller Substanzen und die Einwirkung der transversalen Kräfte des elektrischen Stromes auf alle Materien. Deshalb erschien diese Idee zuerst mehr als ein Gebild ausschweifender Phantasie oder verkehrt geleiteter Philosophie, als der exacten Wissenschaft. Wenn man aber den Baum an seinen Früchten erkennen darf, so hat gerade dieser Gedanke seine Existenzberechtigung klarer dargethan als viele andere Hypothesen, denen man keine falsche philosophische Ader zuschreiben durfte [1].

Zum Sichtbarmachen der geringsten molecularen Veränderungen im Innern von durchsichtigen Substanzen benutzte Faraday das polarisirte Licht. Das Licht einer Argand'schen Lampe wurde, nachdem es durch eine spiegelnde Glasfläche in horizontaler Ebene polarisirt war, durch die zu untersuchende durchsichtige Substanz und hiernach durch ein Nicol'sches Prisma, welches sich um eine horizontale Achse drehen liess, ins Auge geleitet. Das Prisma war so eingestellt, dass das Licht vollständig ausgelöscht wurde. Liess man nun magnetische Kräfte auf die durchsichtigen Körper wirken, so wurde der vorher ausgelöschte Strahl im Nicol wieder sichtbar, und um die Stellung der grössten Dunkelheit wieder zu erreichen, musste der Nicol um ein gewisses Maass gedreht werden. Einige Krystalle und alle luftförmigen Körper ausgenommen, zeigten alle durchsichtigen Substanzen diese Eigenschaften, am stärksten das kieselborsaure Glas. Das borsaure Bleioxyd drehte die Polarisationsebene fast eben so stark, schwächer Flintglas, noch schwächer Crownglas etc. Die Grösse der Drehung schien proportional der Länge der durchlaufenen, durchsichtigen Substanzen und auch der Stromintensität; mit Umkehrung der magnetischen Polarität kehrte sich auch die Richtung der Drehung der Polarisationsebene um. Eine etwa der Flüssigkeit schon eigenthümliche Drehung der Polarisationsebene blieb ohne Einfluss auf die magnetische Drehung und addirte oder subtrahirte sich einfach mit jener [2]. Faraday's Angaben wurden direct bestätigt von

[1] Die folgenden Stellen einer Antwort, welche Faraday den Gebrüdern Davenport auf eine Einladung zu einer spiritistischen Sitzung zugehen liess, zeugen auch ihrerseits dafür, dass bei ihm wenigstens die Kühnheit des Philosophen die Vorsicht des Empirikers nicht beeinträchtigen konnte: „Ich bin Ihnen für Ihre höfliche Einladung verbunden, allein ich bin so oft enttäuscht worden durch die Manifestationen der Geister, denen ich zu verschiedenen Zeiten meine Aufmerksamkeit zuwenden sollte, dass ich nicht ermuthigt bin, noch irgendwie darauf zu achten. . . . Ich bin ihrer überdrüssig.“ (Faraday u. s. Entd., Braunschweig 1870, S. 208).

[2] Exp. res., Ser. XIX: On the magnetization of light and the illumination of magnetic lines of force, Phil. Trans. 1846; Pogg. Ann. LXVIII, 1846.

R. Böttger[1]), Pouillet[2]), Becquerel[3]) u. A. Der Letztgenannte erhielt stärkere Drehungen dadurch, dass er den polarisirten Lichtstrahl durch die durchbohrten Polschuhe des Magneten gehen liess. Faraday glaubte, dass die Drehung der Polarisationsebene durch die directe Einwirkung der magnetischen Kräfte auf den Lichtäther geschehe und bezeichnete jene Erscheinungen deswegen als die Magnetisation des Lichtes. Andere Physiker meinten, dass diese Wirkung keine directe, sondern eine durch die Molecüle des durchsichtigen Körpers vermittelte sei; eine sichere Entscheidung hierüber ist bis heute noch nicht erfolgt.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

Nachdem Faraday so die wunderbare Einwirkung der magnetischen Kräfte auf das Licht nachgewiesen, gelang es ihm nun auch mit stärkeren Apparaten den Einfluss dieser Kräfte auf alle Substanzen noch aufzuzeigen und damit seiner Ahnung von einer Einheit aller polaren Kräfte wenigstens die Möglichkeit der Erfüllung zu sichern. Er betrachtete[4]) zuerst wieder sein gewöhnliches, schweres Glas und fand, indem er dasselbe leicht beweglich vor dem Pole eines sehr starken Elektromagneten aufhing, dass es von diesem abgestossen wurde. Ein längeres Stück dieses Glases stellte sich zwischen den beiden Polen eines hufeisenförmigen Elektromagneten nicht parallel, sondern senkrecht zu der Achse desselben, also statt axial, äquatorial ein. Hiernach prüfte er die verschiedenartigsten Körper durch und bewies, dass alle bekannten festen oder flüssigen Substanzen bei genügender Stärke des Magneten von demselben beeinflusst werden. Diejenigen Körper, welche sich äquatorial am Magneten einstellen, nannte er diamagnetisch, zum Unterschied von denen, die in ihren Bewegungen den gewöhnlichen magnetischen Körpern folgen. Später wandte er das Wort magnetisch nur noch als Gesammtbegriff an und nannte die letzteren Körper paramagnetisch. Als magnetisch gab er an: Eisen, Nickel, Kobalt, Platin, Palladium, Papier, Siegellack, Tusche, Porzellan u. A.; diamagnetisch zeigten sich: schweres Glas, Bergkrystall, Phosphor, Wismuth, Antimon, Zinn, Quecksilber, Silber, Kupfer u. s. w.[5]). Merkwürdig und ohne

---

[1]) Rudolph Böttger (28. April 1806 Aschersleben — 29. April 1881 Frankfurt a. M., Lehrer d. physikal. Vereins in Frankfurt a. M.): Pogg. Ann. LXVII, S. 290, 1846.

[2]) Compt. rend. XXII, 1846.

[3]) Ann. de chim. et de phys. (3) XVII, 1846.

[4]) Exp. res., Ser. XX u. XXI: On new magnetic actions and the magnetic conditions of all matter, Phil. Trans. 1846; Pogg. Ann. LXIX u. LXX, 1846 und 1847.

[5]) Mit welcher Zähigkeit Faraday den Beweis einer theoretisch als wahrscheinlich erkannten Idee suchte, sieht man auch aus Folgendem. Schon 1836 hielt Faraday für möglich, dass die Metalle nur darum nicht alle magnetisch erscheinen, weil niedere Temperaturen schon ihre magnetische Kraft bis zum Erlöschen schwächen. Er prüfte die Metalle auf ihre magnetische Kraft bei einer Temperatur von — 50° C., aber ohne Erfolg. (Pogg. Ann. XXXVII, S. 423, 1836.) 1839 wurden die Versuche bei einer Temperatur von — 80° C.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

Zusammenhang mit den anderen magnetischen Erscheinungen blieb vor der Hand die Beobachtung, dass manche Metalle, wie Kupfer, Silber, Gold etc. zwischen dem Elektromagneten nach Schluss des Stromes mit Hartnäckigkeit die Lage festhielten, in welche sie vor Schluss des Stromes gebracht worden waren.

Der Diamagnetismus aller Substanzen zeigte sich als eine Wirkung der Induction, denn seine Stärke war vollständig von der Stärke des Magnetismus im Elektromagneten abhängig. Danach schien es am natürlichsten, den Diamagnetismus so zu erklären, dass in diamagnetischen Körpern durch Magnete nicht ungleichnamige, sondern gleichnamige Pole, oder dass in ihren Molecülen nicht Ströme nach der Ampère'schen Regel, sondern von umgekehrter Richtung inducirt würden. Doch drückte dies im Grunde genommen nur das Aeussere der Erscheinung aus und war im Wesen recht unwahrscheinlich. Faraday kam darum zur Untersuchung der anderen Möglichkeit, dass die Abstossung diamagnetischer Körper nur herrühre von einer geringeren Stärke ihres Magnetismus gegenüber dem Magnetismus des sie umgebenden Mediums. Diese Untersuchung forderte die Untersuchung des magnetischen Verhaltens der Gase [1]. Nach vielerlei Versuchen, bei denen Faraday die Gase in Röhren eingeschlossen, aber mehr die magnetischen Eigenschaften der letzteren als der ersteren beobachtet hatte, kam er auf den Gedanken, die Gase zwischen den Polen des Magneten ausströmen zu lassen und dieselben, wenn sie nicht gefärbt waren, durch Dämpfe von Ammoniak und Salzsäure sichtbar zu machen. Natürlich erhielt er auch hierbei nicht die magnetischen Wirkungen eines Gases allein; aber er hatte es doch nur mit den Differenzen der Wirkungen von zwei Gasen zu thun. Faraday fand, dass von allen Gasen nur der Sauerstoff gegen die atmosphärische Luft magnetisch war, während die anderen Gase gegen die Luft sich diamagnetisch verhielten; gegen Kohlensäure zeigten sich Sauerstoff, atmosphärische Luft, Stickstoffoxyd etc. magnetisch. Wie schon

wiederholt, wieder mit negativem Erfolg. (Pogg. Ann. XLVII, S. 218, 1839.) 1845 bemerkte er, dass, ausser dem bekannten Eisen und Nickel, auch Kobalt magnetisch ist, 1846 kommen endlich die allgemeinen Resultate. Vereinzelte Beobachtungen über Abstossung von Körpern durch Magnete waren übrigens schon früher gemacht worden. Brugmans hatte 1778 die Abstossung des Wismuths behauptet, Becquerel (Bull. univ. des Sciences VII. Pogg. Ann. X, S. 292) die des Wismuths und des Antimons erkannt. Seebeck (Pogg. Ann. X, S. 203, 1827) meinte, dass alle Substanzen, die Eisen enthielten, vom Magneten afficirt würden und beobachtete an Glasröhren, die mit Eisenfeilspähnen gefüllt waren, „Transversalmagnetismus". (Ueber die Erklärung dieses scheinbaren Transversalmagnetismus an paramagnetischen Körpern siehe Wiedemann, d. Lehre v. d. Elektricität III, S. 794 bis 795, 1883.)

[1] Exp. res., Ser. XXI. Später Phil. Mag. XXXI: On the diamagnetic conditions of flame and gases (Decemb. 1847); auch Pogg. Ann. LXXIII, S. 257, 1848.

Faraday, elektrische Untersuchungen. c. 1830 bis c. 1850.

daraus zu schliessen, muss auch die Kerzenflamme in Luft diamagnetisch sein und von den Magnetpolen abgestossen werden [1]). Entsprechende Resultate erhielt Faraday später auch dadurch, dass er Seifenblasen mit den zu untersuchenden Gasen füllte und dieselben zwischen die Pole seiner Elektromagneten brachte [2]).

Danach ging er zur theoretischen Verwerthung dieser Resultate über. Er machte darauf aufmerksam, dass die Atmosphäre, welche zu einem grossen Theile aus einem so stark magnetischen Körper wie Sauerstoff bestehe, unmöglich ohne Einfluss auf den magnetischen Zustand des Erdkerns selbst bleiben könne, und bemühte sich dann aus den periodischen Einflüssen der Sonne auf die Erdatmosphäre die periodischen Veränderungen der Constanten des Erdmagnetismus abzuleiten [3]). Für die Bestimmung dieser Constanten und der Gesetze ihrer Veränderungen war man gerade in jener Zeit besonders thätig. Ein auf Anregung von Gauss und Alexander von Humboldt gebildeter magnetischer Verein beobachtete simultan an sieben festen Tagen des Jahres in ganz kurzen Intervallen die Stellung der Magnetnadel an mehr als zwanzig über fast ganz Europa vertheilten Stationen, und diesen Beobachtungen correspondirten andere auf allen Continenten und selbst auf dem Meere. Die Beobachtungen des Vereins schlossen fast alle mit dem Jahre 1842. Lamont machte später darauf aufmerksam, dass der Werth der meisten dieser Beobachtungen dem Eifer, der Mühe und Arbeit nicht ganz entspräche [4]). Die wichtigste Frucht derselben sind wohl die von Gauss und W. Weber herausgegebenen „Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins 1836 bis 1841“ (Göttingen 1837 bis 1843). Darin finden sich die Beschreibung und die Theorie der von Gauss construirten neuen Instrumente zur genauen Bestimmung der Elemente des Erdmagnetismus, das (Unifilar-) Magnetometer (Resultate Bd. I, erschienen 1837) und das Bifilarmagnetometer [5]) (Resultate Bd. II, erschienen 1838), sowie des von W. Weber erfundenen Inclinatoriums (Resultate 1837). Eine Theorie des Erd-

---

[1]) Diese Erscheinung hatte A. Bancalari schon vor Faraday im September 1847 beschrieben; Zantedeschi hatte dessen Beobachtungen bestätigt und erweitert. (Racc. fis. chim. III, Pogg. Ann. LXXIII, S. 286, 1848.) Durch den Letzteren wurde Faraday mit den Versuchen bekannt und nahm danach erst seine eigenen Versuche über den Magnetismus der Gase wieder auf. (Faraday und seine Entdeckungen von Tyndall, Braunschweig 1870, S. 104.)

[2]) Exp. res., Ser. XXV: On the magnetic and diamagnetic condition of bodies, Phil. Trans. 1851; Pogg. Ann. Ergzbd. III, 1853.

[3]) Exp. res., Ser. XXVI: Magnetic conducting power; atmospheric magnetism, Phil. Trans. 1851; Pogg. Ann. Ergzbd. III, 1853. Ser. XXVII: atm. mag. continued, Phil. Trans. 1851. Pogg. Ann. Ergzbd. III.

[4]) Die Fortschritte der Physik, herausgegeben von der Berliner physikalischen Gesellsch. III, S. 517 bis 562, 1847.

[5]) Kurze Zeit vor Gauss hatte W. Snow Harris die bifilare Aufhängung für eine Art Coulomb'scher Drehwage angewandt und empfohlen (Phil. Trans.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

magnetismus, welche Gauss im III. Bde. dieser Resultate giebt, ist mehr eine mathematische Bestimmung der Vertheilung des Magnetismus auf der Erdoberfläche aus den einzelnen Beobachtungen als eine Untersuchung über die Ursache und das Wesen des Erdmagnetismus. Von allgemeinster, weit über das Gebiet des Magnetismus hinaus alle physikalischen Disciplinen berührender Wichtigkeit dagegen ist die Abhandlung Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata[1]) geworden. Da alle Kräfte nur erfahren und also auch nur gemessen werden können durch die Bewegungen, welche sie hervorbringen, so sind zur Bestimmung aller Kräfte nur drei fundamentale Maasseinheiten, die Raumeinheit, die Zeiteinheit und die Masseneinheit nöthig. Leitet man alle anderen Maasseinheiten nur aus diesen dreien ab, so sind dadurch alle Maassangaben mit einander vergleichbar, und ein so gebildetes Maasssystem nennt Gauss das absolute. Als Einheit der Zeit nimmt Gauss die Secunde, als Einheit der Länge das Millimeter, als Einheit der Masse die Masse eines Milligramms[2]). Die Einheit der Kraft ist dann diejenige Kraft, welche der Masseneinheit in der Zeiteinheit die Beschleunigung 1 ertheilt. Als Einheit des Magnetismus wird diejenige Menge definirt, welche auf eine gleiche Magnetismusmenge in der Einheit der Entfernung die Einheit der Kraft ausübt. Diese Definitionsart, die sich leicht auf andere physikalische Potenzen ausdehnen lässt, hat sich nach Gauss langsam ausgebreitet und auch an ihrer Stelle dazu beigetragen, der Anschauung von der Einheit aller Naturkräfte den Weg zu ebenen.

Währenddem aber hatte Faraday die Verbreitung des Magnetismus durch die Körper noch nach einer anderen Seite hin verfolgt. Die ideelle Identität aller Naturkräfte, besonders der beobachtete Zusammen-

---

1836). Vergl. Stähelin, die Lehre von der Messung der Kräfte mittelst der Bifilarsuspension, abgedruckt in „Principien einer elektrodynamischen Theorie der Materie" von Zöllner, Leipzig 1876, S. CII.

[1]) Comm. Soc. Gott. VIII, 1832 bis 1837; Pogg. Ann. XXVIII, S. 241, 591, 1833; Gauss' Werke V, S. 79 bis 118.

[2]) Als Milligramm muss hier der tausendste Theil eines aufbewahrten Normalgramms gedacht werden, als Millimeter der tausendste Theil eines aufbewahrten Urmeters, als Secunde der 86 400 ste Theil eines mittleren Sonnentages, der erst wieder vom Sternentag und der Jahreslänge abhängt. Alles dies sind schliesslich willkürlich angenommene, künstliche Einheiten. Allgemeinere, natürlichere Einheiten würden sein: für die Länge, die Wellenlänge einer bestimmten Lichtart im Vacuum; für die Zeit, die Oscillationsdauer dieser Lichtart; für die Masse, die Masse eines einzelnen Molekels einer bestimmten Substanz. Maxwell aber, der diese Einheiten angiebt, bemerkt dazu: solche Einheiten sollten von denen angenommen werden, „welche ihren Schriften eine grössere Lebensdauer zusprechen möchten als unserem Planeten". (Maxwell, Elektricität und Magnetismus, Berlin 1883, I, S. 5 u. 6).

hang zwischen Elektricität und Magnetismus und Licht liess vermuthen, dass die Verbreitung des Magnetismus in Krystallen, wie die Fortpflanzung des Lichtes in denselben, nach verschiedenen Seiten eine verschiedene sein werde. Schon früher hatte er Versuche in dieser Richtung mit der Influenz statischer Elektricität gemacht, die negative Resultate ergaben [1]); jetzt zeigten sich ihm merkwürdige Erkenntnisse in Bezug auf eine ungleichseitige Wirkung des Magnetismus in Krystallen. Plücker bemerkte im Jahre 1847 [2]), dass ein optisch einachsiger Krystall zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten sich so einstellt, dass seine Achse zur Achse des Magneten senkrecht gerichtet, und dass dies Verhalten von dem para- oder diamagnetischen Charakter des Krystalls unabhängig ist. Faraday fand, dass künstlich krystallisirtes Wismuth sich nicht diamagnetisch richtet, sondern so, dass seine Hauptspaltungsfläche der Magnetachse parallel ist, und dass diese Stellung nicht von der sonstigen Form des Wismuths abhängt. Aehnliche magnetische Erscheinungen, die ebenfalls nicht, wie die para- und diamagnetischen, durch die äussere Form, sondern durch die krystallographischen oder optischen Achsen bedingt sind, zeigten sich dann auch an anderen Stoffen, wie Antimon, Arsen etc. Faraday bewies ausserdem, dass diese magnetischen Kräfte nicht anziehend oder abstossend, sondern nur richtend wirken, und meinte dieselben darum auch durch den Namen von den magnetischen trennen zu müssen. Er nannte dieselben magnekrystallische Kräfte und die Achsen, nach denen sie wirken, Magnekrystallachsen [3]). Da dieselben von der molecularen Beschaffenheit der Stoffe abhängen, erwartete er von ihrer Untersuchung neue Aufschlüsse für die Moleculartheorie und sagt bezeichnend für seine Ansicht vom Wesen der Kraft: „Ich kann diese Reihe von Untersuchungen nicht schliessen, ohne bemerklich zu machen, wie rasch unsere Kenntniss von den Molecularkräften wächst, wie schlagend jede Forschung uns deren Wichtigkeit mehr entfaltet und deren Studium anziehend macht. Vor wenig Jahren noch war uns der Magnetismus eine dunkle, nur auf wenige Körper wirkende Kraft, jetzt wissen wir, dass er auf alle Körper wirkt und in innigster Beziehung steht zur Elektricität, Wärme, chemischen Action, zum Licht, zur Krystallisation, und, durch diese wiederum, zu den Cohäsionskräften. Bei solchem Zustand der Dinge mögen wir uns wohl angetrieben fühlen, unsere Arbeiten fortzusetzen, ermuthigt

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

---

[1]) Exp. res., Ser. XIV; Pogg. Ann., Ergzbd. I, S. 259, 1839.

[2]) Pogg. Ann. LXXII, S. 315, 1847 (October).

[3]) Exp. res., Ser. XXII: On the crystalline polarity of bismuth (and other bodies) and of its relation to the magnetic form of force, Phil. Trans. 1849; Pogg. Ann. LXXVI, 1849, Ergzbd. III, 1853.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

durch die Hoffnung, den Magnetismus selbst mit der Gravitation in Verbindung zu setzen"[1]).

Dies zuletzt angegebene Ziel versuchte Faraday in der That, gleich nachdem er noch in einer Serie[2]) seine Untersuchungen über die Magnekrystallkraft zu einem gewissen Abschluss gebracht, in der folgenden Serie seiner Experimentaluntersuchungen zu erreichen[3]). Er wickelte zu dem Zwecke einen 350 Fuss langen, übersponnenen Kupferdraht zu einem hohlen Cylinder von 4 Zoll Länge, 1 Zoll innerem und 2 Zoll äusserem Durchmesser auf, verknüpfte mit den Enden desselben zwei zusammengedrehte Kupferdrähte, die zu einem empfindlichen Galvanometer führten, und liess dann den Cylinder aus einer Höhe von 36 Fuss auf ein weiches Kissen fallen, so dass immer die Achse der Spirale senkrecht blieb. Doch fand sich dabei keine Spur einer Umsetzung von Fallkraft in Elektricität. Faraday schliesst die betreffende Serie seiner Veröffentlichungen wiederum charakteristisch mit den Worten: „Hier enden für jetzt meine Versuche, ihre Resultate sind negativ, dennoch ist mein Glaube an das Dasein einer Beziehung zwischen Schwerkraft und Elektricität dadurch nicht erschüttert"[4]).

Die physikalischen Arbeiten Faraday's werden von seinem Begriff der Kraft beherrscht, und dieser Begriff ist bei ihm nach zwei Seiten hin originell. Keine Kraft wirkt unvermittelt in die Ferne, und alle Naturkräfte sind in einander umwandelbar und im Grunde nur Formen einer einzigen Kraft. Nie denkt er sich die Kraft an einen Punkt gebunden, von dem aus dieselbe unvermittelt ihre Wirkungen auf entfernte Körper übt. Ihm ist vielmehr jede Kraft eine Kraftaxe oder Kraftlinie, die überall da existent ist, wo die Kraft eine Wirkung ausübt. Die Kraftlinien eines leuchtenden Körpers sind die Lichtstrahlen, die von ihm ausgehen, die eines warmen Körpers die Wärmestrahlen; die Magnetkraftlinien werden durch Eisenfeile angezeigt, welche man auf und um den Magneten streut; man erhält sie auch, wenn eine kleine Magnetnadel in jeder, ihrer Länge entsprechenden Richtung so bewegt wird, dass sie beständig eine Tangente der Bewegungslinie bleibt. Allgemein ist die Kraftlinie die Bahn eines Punktes, der sich immer in der Richtung der auf ihn wirkenden Kraft oder auch so fortbewegt, dass seine Bahn die Niveauflächen der Kraft rechtwinklig schneidet. Denkt man sich für eine gewisse Kraft und einen gewissen Raum alle Kraftlinien construirt, so giebt die

---

[1]) Pogg. Ann. Ergzbd. III, S. 56, 1853.

[2]) Exp. res., Ser. XXIII: On the polar or other conditions of diamagnetic bodies, Phil. Trans. 1850; Pogg. Ann. LXXXII, 1851.

[3]) Exp. res., Ser. XXIV: On the possible relation of gravity to electricity, Phil. Trans. 1851; Pogg. Ann. Ergzbd. III, 1853.

[4]) Pogg. Ann. Ergzbd. III, S. 72.

Concentration und die Richtung derselben in jedem Punkte die Grösse und Richtung der in diesem Punkte wirksamen Kraft. Faraday, dem das mächtige Hülfsmittel der Mathematik nicht zu Gebote stand, benutzte zur Bestimmung der Kraftintensität in einem Punkte die anschauliche Construction seiner Kraftlinien. Das zeigt sich schon in seinen ersten Arbeiten über die elektrische Influenz und dann in allen folgenden. Systematischer bildete er die Theorie derselben in den letzten Serien seiner Experimentaluntersuchungen aus[1]). Da aber betrachtet er diese Kraftlinien durchaus nicht mehr als eine Constructionshülfe, sondern spricht ihre reale Existenz mindestens als wahrscheinlich aus. Da nun die Kraft im ganzen Raum thätig ist, so müssen auch die Kraftlinien den Raum stetig erfüllen und eine physische Existenz der Kraftlinien setzt eine continuirliche Erfüllung des Raumes absolut voraus. Wirklich beginnt auch Faraday gegen die Atomentheorie zu polemisiren und ihre Schwierigkeiten blosszulegen. Ja endlich kommt er sogar bis zur ganz radicalen Vorstellung von einer Materialität des continuirlichen Raumes. Doch giebt er diese Ideen nicht als fest aufgestellte Hypothesen oder gar von ihm als wahr zu vertheidigende Grundlagen seiner Physik. Er behandelt dieselben nur als zu überlegende Möglichkeiten, bei denen die Behandlung von Gegensätzen nicht ausgeschlossen ist. Er giebt jene Ideen nur als Vorschläge zur Discussion, oder höchstens zu neuer experimenteller Prüfung. Er behandelt sie nicht für Schüler zum Nachlernen, sondern für Mitstrebende zur Prüfung. Das macht ihre Darstellung recht schwer, die eigene Prüfung aber sehr interessant und anregend.

Faraday, elektrische Untersuchungen c. 1830 bis c. 1850.

Während aus diesen Anschauungen der Kraftwirkung die Negirung aller unvermittelten Wirkungen nur als Ahnung, nur als Ideal hervortritt, hält Faraday die Umwandlungsfähigkeit aller Kräfte schon früher und sicher im ganzen Umfange als festes Naturprincip aufrecht. Dies geht aus allen seinen Deductionen klar hervor, und noch vor dem Jahre 1840 spricht er die Idee von der Erhaltung der Kraftquantität in allen Formen bestimmt aus: „In Zukunft mögen wir im Stande sein, Corpuscularkräfte, wie die der Schwere, Cohäsion, Elektricität und chemischen Verwandtschaften, mit einander zu vergleichen und auf diese oder andere Weise ihre relativen Aequivalente

[1]) Exp. res., Ser. XXVIII: On lines of magnetic force, their definite character and their distribution within a magnet and through space; Phil. Trans. 1852. Ser. XXIX: On the employment of the induced magneto-electric current as a test and measure of magnetic force, Phil. Trans. 1852. Ser. XXX: Constancy of differential magnecristallic force in different media. Action of heat on magnecrystals; Phil. Trans. 1855. Poggendorff hat in seinen Annalen der Physik und Chemie statt einer Uebersetzung dieser letzten drei Reihen „aus Mangel an Raum“ nur einen sehr kurzen Auszug gegeben.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

und ihre Effecte abzuleiten; für jetzt vermögen wir es nicht"[1]). Man könnte dabei fragen, warum denn Faraday danach nicht selbst zum Beweis für die Erhaltung der Kraft in allen Transformationen gekommen sei. Vielleicht dürfte man als Erklärung dafür noch anführen, dass Faraday's Genie wohl mächtig genug gewesen, bei Lösung seiner Aufgabe alle Mängel seiner Vorbildung vergessen zu machen, dass aber in der Wahl seiner Aufgaben sich der Mangel an mathematischem Interesse doch noch anzeigt.

Faraday ist eine ganz eigenartige Gestalt in der Reihe der Physiker. So folgerichtig seine Untersuchungen sich an einander schliessen, so geschlossen sind sie in sich selbst. Faraday's Verbindungen mit den übrigen Physikern ist einseitig; er ist fast stets der Gebende, selten der Empfangende. Er nimmt seine Aufgaben nicht zufällig von anderen Physikern auf, sondern entwickelt sie originell aus der Sache selbst. Er wird nicht bewegt durch die geltenden Ideen seiner Zeit, sondern findet seine Anregung in Anschauungen, die kaum von seinen Zeitgenossen verstanden und jedenfalls nicht getheilt werden. Darum hat er im gewöhnlichen Sinne des Wortes keine Schule gemacht, und gewisse Classen von Physikern haben sich sogar von jeder Beeinflussung durch Faraday geflissentlich fern gehalten. Die grossen experimentellen Entdeckungen, die galvanische Induction, die Gesetze der Elektrolyse, die Magnetisation des Lichtes und der Diamagnetismus, fanden begeisterte Aufnahme und verbreiteten seinen Ruhm überall; seine Ideen über diese Erscheinungen aber fanden mehr Gegner als Freunde. Erst in neuerer Zeit sind durch Thomson, Tyndall und Maxwell vor allem seine Kraftlinien zu Ehren gekommen, so dass sie nun kaum noch in einem Lehrbuch des Magnetismus und der Elektricität fehlen; auch ist die Lehre vom Potential so eng mit der Theorie der Kraftlinien verknüpft, dass man die weitgehende Benutzung des ersteren Begriffs wohl als einen Sieg der Faraday'schen Ideen betrachten darf. Ob man danach auch auf eine weitergehende Annahme der ganzen Anschauung Faraday's vom Wesen der Kraft und der Materie schliessen darf, überlassen wir dem Urtheil unserer Leser. Wir aber haben aus der charakteristischen Geschlossenheit der wissenschaftlichen Persönlichkeit Faraday's die Veranlassung und das Recht genommen, seine Wirksamkeit an dieser Stelle im Ganzen zu betrachten, obgleich dieselbe, vorzüglich in der letzten Ausbildung der Ideen, noch weit in die nächste Epoche der Physik hinüber reicht[2]).

---

[1]) Exp. res., Ser. XIV, §. 1686; Pogg. Ann. Ergzbd. I, S. 255, 1839.

[2]) Eine treffliche Vergleichung Faraday's mit Ampère, die Maxwell in seinem Lehrbuche der Elektricität und des Magnetismus (Berlin 1883, II, S. 216 bis 217) giebt, kann ich nicht unterdrücken. „Obgleich er (Ampère) bei seinen Auseinandersetzungen der inductiven Methode folgt, so gestattet er uns doch keinen Einblick in die Werkstatt seiner Gedanken. Wir

Faraday, elektrische Unter-suchungen c. 1830 bis c. 1850.

Neben diesen Fortschritten der Elektricitätstheorie bleiben uns noch die Anfänge der Elektrotechnik aus diesem Zeitraume zu erwähnen. Dass die Versuche der Anwendung der Elektricität zur Erzeugung mechanischer Kraft und umgekehrt vorerst noch scheiterten, haben wir schon erwähnt, dafür erheben sich zwei andere Zweige der Elektrotechnik direct aus dem Kindheitszustande zu verhältnissmässig hoher Reife.

Daniell war es bald nach der Construction seines Elementes aufgefallen, dass das ausgeschiedene Kupfer sich als Ganzes von der Elektrode ablösen liess und dann ein negatives, aber treues Abbild dieser Elektrode gab. De la Rive kam im September 1836 zu derselben Beobachtung. Den ersten Gedanken an eine technische Benutzung dieser Thatsache fasste Jacobi im Februar 1837, und nach ihm, aber unabhängig von ihm, Spencer im September 1837. Jacobi veröffentlichte seine Ideen in dem Philosophical Magazine (Bd. XV, 1839) und gab dann in einem selbstständigen Werke „die Galvanoplastik“ (Petersburg 1840) eine genaue, zweckmässige Anweisung für das Verfahren der galvanoplastischen Nachbildung. Danach gelangte diese durch R. Böttcher, Kobell u. A. zur schnellen Ausbildung; auch das Niederschlagen von Metallüberzügen auf andere Metalle durch Galvanismus entwickelte sich um dieselbe Zeit[1]).

Der Gedanke an eine elektrische Telegraphie erstand direct, als man die leichte Uebertragbarkeit der elektrischen Erscheinungen auf weite Entfernungen bemerkte. Fast alle Arten von elektrischen Er-

---

sehen nicht, wie sich bei ihm selbst Schluss an Schluss gereiht hat, und können kaum glauben, dass Ampère sein Gesetz wirklich mit Hülfe der Experimente ergründet hat, die er uns beschreibt. Wir müssen vermuthen — und er erzählt es sogar selbst — dass er sein Gesetz auf einem anderen Wege, von dem er uns nichts mittheilt, entdeckt hat, und dass er dann, als er für dasselbe einen vollständigen Beweis aufbaute, vom Gerüst, dass ihm zur Aufrichtung seines Gebäudes diente, alle Spuren entfernt hat.

Ganz anders verfährt Faraday. Er berichtet von seinen erfolglosen Versuchen nicht minder wie von den erfolgreichen, er theilt seine noch rohen Vorstellungen ebenso wie seine schon ausgebildeten mit. Deshalb fühlt der Leser, wenn er ihn auch an inductiver Kraft nicht erreicht, doch mehr Sympathie als Bewunderung für den Forscher, und er wird fast zu dem Glauben verleitet, dass er selbst, wenn ihm nur die Gelegenheit geboten würde, auch ein solcher Entdecker werden könnte.

Der Studirende soll Ampère's Schrift lesen, um an einem glänzenden Vorbilde zu lernen, wie man bei der Begründung und dem Ausbau einer Entdeckung zu verfahren hat. Er soll aber auch, wenn er seinen wissenschaftlichen Geist bilden will, Faraday's Untersuchungen eifrig studiren, denn, indem ihn der Verfasser in die Geschichte seiner Entdeckungen und in seinen Ideengang einführt, fordert er ihn zur Kritik des Weges, auf dem er zu seinen Resultaten gelangt ist, heraus und zeigt ihm, wie man wissenschaftliche Forschungen anzustellen hat.“

[1]) Vergl. Joh. Müller, Bericht über die neuesten Fortschr. der Physik I, S. 448, Braunschweig 1849 bis 1852; Albrecht, Geschichte der Elektricität, S. 296, Wien 1885.

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

scheinungen hat man der Reihe ihres Entstehens nach für die Anwendung auf die Telegraphie vorgeschlagen. Doch wurde das Problem einer verhältnissmässig billigen, nie versiegenden und in ihren Signalen sicheren Telegraphie erst in dieser Periode gelöst. Kaum hatte Watson 1747 die Elektricität einige Meilen weit durch die Themse geleitet, so machte 1753 ein unbekannter C. M. in Scott's Magazine den Vorschlag, die elektrische Entladung und das Anziehen leichter Körperchen durch die Elektricität zum Telegraphiren zu verwenden. Lesage führte 1774 einen ähnlichen Plan wirklich aus, indem er 25 Drähte mit Hollundermarkpendeln an ihren Enden zum Signalisiren gebrauchte. Salva richtete für den König von Spanien 1798 in der Nähe von Madrid eine Telegraphenlinie ein, auf welcher durch elektrische Funken signalisirt wurde. Alle diese Versuche scheiterten natürlich schon an der Inconstanz ihrer Kraftquelle. Der galvanische Strom aber, der von Anfang an in dieser Beziehung geeigneter war, zeigte sich wieder unbequemer in Bezug auf seine Verwendung zu Signalen. Der Vorschlag Sömmering's vom Jahre 1809, nach dem das Aufsteigen der Wasserstoffbläschen an dem einen im Wasser geleiteten Poldraht als Zeichen benutzt werden sollte, war gewiss nicht durchführbar. Erst mit der Ablenkung der Magnetnadel durch den galvanischen Strom gewann man ein annehmbares Zeichen, das sicher und leicht übertragbar war, und noch im Jahre 1820 schlug Ampère auch die Benutzung desselben für die elektrische Telegraphie vor. Danach blieb dem galvanischen Telegraphen als Hinderniss der Einführung nur noch die Kostspieligkeit seiner vielen Leitungsdrähte. Dieser Uebelstand wurde erst geraume Zeit nach jenem Vorschlage Ampère's eliminirt. Schilling soll 1832 (die Jahreszahl scheint unsicher) bemerkt haben, dass man nur zwei Drähte gebrauche, um durch Umkehren des Stromes die Nadel willkürlich nach rechts oder nach links ablenken und durch Combination dieser zwei Zeichen auch das ganze Alphabet telegraphiren zu können. Jedenfalls führten Gauss und Weber 1833 einen solchen Vorschlag in Göttingen unabhängig von Schilling wirklich aus; als Stromquelle diente ihnen eine Inductionsspule[1]). Auch Steinheil

[1]) Gauss schreibt an Olbers am 20. November 1833: „Ich weiss nicht, ob ich Ihnen schon früher von einer grossartigen Vorrichtung, die wir gemacht haben, schrieb. Es ist eine galvanische Kette zwischen der Sternwarte und dem physikalischen Cabinet, durch Drähte in der Luft über die Häuser weg, oben zum Johannisthurm hinauf und wieder herab, gezogen. Die ganze Drahtlänge wird etwa 8000 Fuss sein. An beiden Enden ist sie mit einem Multiplicator verbunden. . . . Ich habe eine einfache Vorrichtung ausgedacht, wodurch ich augenblicklich die Richtung des Stromes umkehren kann, die ich einen Commutator nenne. . . . Wir haben diese Vorrichtung bereits zu telegraphischen Versuchen gebraucht, die sehr gut mit ganzen Worten oder einfachen Phrasen gelungen sind. . . . Ich bin überzeugt, dass unter Anwendung von hinlänglich starken Drähten auf diese Weise auf Einen Schlag von Göttingen nach Hannover oder von Hannover nach Bremen telegraphirt werden könnte.“ (Gauss, Festrede von Schering, Göttingen 1877, S. 15 bis 16.)

in München gebrauchte seit 1837 Inductionsströme zum Telegraphiren, die er aber durch eine elektromagnetische Maschine, ähnlich der 1833 von Pixii erfundenen, erzeugte. Er vermochte schon mit seinen Nadeln hörbare Signale zu geben, die Zeichen von den Nadeln wirklich aufschreiben zu lassen, und, was praktisch ebenso wichtig, er bemerkte, dass man die Erde als Rückleitung der Elektricität gebrauchen und so mit einem einzigen Draht telegraphiren könne. Damit war im Princip unsere heutige Telegraphie begründet. Wheatstone, der von 1837 an seinen Nadeltelegraphen auf englischen Bahnen einführte, that weiter nichts als dass er den Apparat bequemer für die Handhabung gestaltete und wieder zu den galvanischen Elementen als Stromquelle zurückkehrte. Einen viel stärkeren Fortschritt bedeutete die Benutzung des Elektromagneten für die Telegraphie durch Morse. Morse's erstes Modell soll schon 1835 fertig gewesen sein, 1840 erhielt es im Princip die heutige Einrichtung, aber erst 1844 wurde die erste Telegraphenlinie, die mit Morse-Apparaten arbeitete, die Linie von Washington nach Baltimore, dem Verkehr übergeben. Der Elektromagnet der Empfangsstation wog noch 158 Pfund, der Apparat war also gewiss nicht das, was man handlich nennt. Die heutige, compendiöse Form erhielt er erst später, vor allem durch Professor Page[1]).

Faraday, elektrische Untersuchungen, c. 1830 bis c. 1850.

Die **Undulationstheorie des Lichtes** war durch Fresnel nicht bloss zum Siege geführt, sie war auch fundamental so weit entwickelt worden, dass sie alle die neu beobachteten, so complicirten Erscheinungen, wie die Doppelbrechung, die Polarisation des Lichtes, vollkommen deckte. Den Nachfolgern Fresnel's blieb hier vor der Hand weiter nichts übrig, als eine Vereinfachung der verwickelten Fresnel'schen Ableitungen, eine genauere Begründung seiner Elasticitätstheorie und die Anwendung seiner Formeln auf einzelne specielle Fälle. Nur in einem Punkte hatte Fresnel eine theoretische Lücke gelassen und bewusst lassen müssen, in der Erklärung der verschiedenen Brechbarkeit der Farben, ein fundamentales, für die Undulationstheorie von alter Zeit her bösartiges Problem.

Optik, c. 1830 bis c. 1810.

Die Brechbarkeit des Lichtes ist abhängig von der Fortpflanzungsgeschwindigkeit desselben; da nun die verschiedenfarbigen Lichtstrahlen verschiedene Brechbarkeit besitzen, so muss die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des verschiedenfarbigen Lichtes verschieden sein, oder die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes muss von der Wellenlänge abhängen. Weder die Beobachtung noch die Theorie liessen jedoch etwas von einer solchen Abhängigkeit erkennen. Die Analogie mit dem Schall sprach entschieden gegen die letztere, denn eben war man nach vielen Versuchen zu dem sicheren

[1]) Vergl. Müller, Bericht über die neuesten Fortschr. I, S. 557, Braunschweig 1849 bis 1852. J. Hamel, Die Entstehung der galv. und elektromagnetischen Telegraphie, Bull. de St. Petersb. II, S. 97 u. 298. Hoppe, Geschichte der Elektricität, S. 574. Albrecht, Gesch. d. Elektr., S. 256.

Optik, c. 1830 bis c. 1840.

Ergebniss gekommen, dass alle Töne mit gleicher Geschwindigkeit durch die Luft fortgepflanzt würden.

Von einer directen Beobachtung des Lichtes auf irdische Entfernungen hin konnte man bei der Grösse der Fortpflanzungsgeschwindigkeit keinesfalls Ergebnisse erwarten; aber auch Beobachtungen an Himmelskörpern ergaben keine Differenzen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit für die verschiedenen Farben. Auf Veranlassung Newton's hatte schon Flamstead constatirt, dass beim Anfang und Ende der Verfinsterung der Jupitertrabanten durchaus keine Farbenerscheinungen auftraten. Arago, der bei ähnlichen, günstigeren Beobachtungen ebenfalls zu negativen Ergebnissen gekommen, machte darauf aufmerksam, dass vielleicht auch die Entfernung des Jupiter von der Erde für solche Messungen noch zu klein sei, dass aber bei Sternen von veränderlicher Helligkeit jedenfalls eine Farbenveränderung beobachtet werden müsse, wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des verschiedenfarbigen Lichtes verschieden sein sollte. Beobachtungen am Stern Algol aber, der in $3^1/_2$ Stunden von der zweiten Grösse zur vierten übergeht, führten auch ihn zu Resultaten, nach denen die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der rothen und violetten Strahlen nicht um $^1/_{100\,000}$ ihres Werthes verschieden sein konnten [1]).

Fresnel's Formeln für die Wellenbewegungen des Aethers ergaben nicht bloss für den leeren Raum, sondern überhaupt, eine constante Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Aetherschwingungen, die von der Elasticität und Dichte des Mediums, aber nicht von der Wellenlänge der Schwingungen abhing. Poisson hielt dieses Ergebniss für einen Beweisgrund gegen die Undulationstheorie [2]); Fresnel aber wies darauf hin, dass er bei jenen Formeln den Einfluss der Körpermolecüle auf den Aether vernachlässigt habe, und dass bei Berücksichtigung dieses Einflusses wohl auch die Erklärung der Dispersion aus der Undulationstheorie folgen werde [3]). Diesen Gedanken bildete Cauchy erfolgreich aus, der sich schon seit 1822 mit der Theorie der Elasticität beschäftigt hatte und von 1829 an in vielen Abhandlungen die Dispersion des Lichtes behandelte [4]).

---

[1]) Verdet, Vorles. über die Wellentheorie des Lichtes II, S. 11, Braunschweig 1884. [2]) Extrait d'un Mém. de la propagation du mouv. dans les fluides. Ann. d. chim. et d. phys. XXII, p. 250, 1823. [3]) Réponse à une lettre de Mr. Poisson, Ann. d. chim. et d. phys. XXIII, p. 119, 1823. [4]) Die Hauptabhandlung Mém. sur la dispersion de la lumière wurde von der königl. Gesellschaft der Wissenschaften in Prag preisgekrönt und herausgegeben; sie findet sich in den Nouveaux exercices mathématiques, Prag 1835 bis 1836. Eine kürzere, einfachere Darstellung der Cauchy'schen Theorie gab Radicke in Dove's Repertorium der Physik, Band III; vergl. auch Verdet, Wellentheorie des Lichtes II, S. 1, Braunschweig 1884. Vor Cauchy hatte schon Challis (Phil. Mag. (2) VIII, 1830 und Phil. Mag. (3) II, 1832) den Versuch gemacht, die Dispersion des Lichtes nach der Undulationstheorie zu erklären, und zu diesem Zwecke die Dimensionen der Aetheratome als sehr klein im Verhältniss zu ihren Entfernungen angenommen.

Optik, c. 1830 bis c. 1810.

Cauchy nimmt an, dass der Aether aus Atomen besteht, deren Entfernungen gegen ihre Dimensionen unendlich gross sind. Im freien Aether sind diese Abstände gegen die Wellenlänge des Lichtes immer noch verschwindend; dagegen werden in den Körpern, wo die Geschwindigkeit des Lichtes überhaupt und damit auch die Wellenlängen kleiner sind, diese Verhältnisse der Wellenlängen gegen die Abstände der Aethermolecüle endlich, so dass man wenigstens bei transversalen Wellen dieselben berücksichtigen muss. Indem dann Cauchy seinen Formeln die Glieder, welche sich auf das Verhältniss der Wellenlänge zur Entfernung der Aethermolecüle beziehen, einfügte, kam er zu einer Reihe für die Geschwindigkeit des Lichtes, welche von der Wellenlänge abhängig war und damit für verschiedenfarbiges Licht verschiedene Grössen der Brechung ergab. Die betreffende Formel

$$v^2 = a + \frac{bn^2}{\lambda^2} + \frac{cn^4}{\lambda^4} + \frac{dn^6}{\lambda^6} + \dots,$$

in welcher $v$ die Geschwindigkeit des Lichtes in einem Mittel, $n$ der Brechungsexponent dieses Mittels bezogen auf den leeren Raum, $\lambda$ die Wellenlänge im Raume und $a, b, c \dots$ nur von der Constitution des Mittels abhängende Coefficienten bedeuten, bestätigte Cauchy an den Versuchen Fraunhofer's. Baden Powell aber hatte noch vor dem Erscheinen von Cauchy's Hauptabhandlung eine empirische Formel für den Brechungsexponenten abgeleitet, an die sich die Cauchy'sche ganz gut anschliesst[1]). Briot[2]) macht gegen die Cauchy'sche Annahme von dem endlichen Verhältniss der Molecularentfernung zur Wellenlänge in den Körpern geltend, dass dieses Verhältniss im freien Aether nicht viel kleiner sein könne, als im Aether zwischen der Materie; denn wenn im freien Raume die Wellenlänge etwas grösser sei, so sei dafür auch die Entfernung der Aethermolecüle etwas grösser als in der Materie. Er hält dafür, dass die Vertheilung des Aethers in den Körpern eine andere ist, als im freien Raume, dass unter dem Einfluss der Körpermolecüle die Dichtigkeit des Aethers zwischen denselben wechselnd sein müsse und leitet aus dieser Hypothese eine der Cauchy'schen Formel ähnliche Formel ab. Später hat Bussinesq[3]), entgegen Briot, den Aether wieder überall als gleich dicht und gleich elastisch angenommen und dafür, was Briot als unerheblich vernachlässigt, die Einwirkung des undulirenden Aethers auf die Körpermolecüle und die Rückwirkung dieser zur Erklärung der Verlangsamung der verschiedenen Lichtwellen in durchsichtigen Medien benutzt.

Cauchy hat später seine Lichttheorie in zahlreichen Abhandlungen weiter entwickelt und theilweise auch modificirt. Jedenfalls aber war durch Cauchy's damalige Arbeiten schon bewiesen, dass die Undu-

---

1) Phil. Trans. 1835, p. 249.

2) Essay sur la théor. math. de la lumière, Paris 1863; deutsch von Klinkerfues, Leipzig 1867.

3) Liouville's Journal XIII, 1868: Théor. nouv. des ondes lumineuses.

Optik, c. 1830 bis c. 1840.

lationstheorie auch die Dispersion des Lichtes in ihre Kreise ziehen könne, und damit war endlich der letzte dunkle Punkt aus dieser Theorie entfernt. Dagegen blieb zweifelhaft, aber im Erfolg auch gleichgültig, ob man die Schwingungen des Aethers im polarisirten Lichte senkrecht oder parallel zur Polarisationsebene annehmen sollte. Fresnel hatte das erstere für richtig gehalten und Cauchy war, nachdem er vorher anderer Meinung gewesen, zuletzt derselben Meinung gefolgt. Neumann dagegen ging in seiner Doppelbrechung von der zweiten Hypothese aus[1]). Die meisten Optiker haben sich danach Fresnel und Cauchy angeschlossen, aber auch Neumann's Ansicht hat bis in die neueste Zeit Anhänger und Vertheidiger gefunden.

Die theoretische Optik ruhte seit Fresnel voll und ganz auf den Ansichten über die Constitution des Aethers und der ponderablen Materie und wurde nach Cauchy eine Hauptstütze der Atomistik. Doch führten alle die aufgestellten Hypothesen mehr den Charakter schätzbarer Vorarbeiten als endgültiger Entscheidungen. Auch die theoretische Optik machte mehr das Bedürfniss einer Moleculartheorie fühlbar, als dass sie dasselbe zu befriedigen vermochte. Wir können auf alle diese Arbeiten nicht näher eingehen als es schon geschehen, müssen uns aber noch mit einigen Untersuchungen beschäftigen, die bis dahin ausserhalb des systematischen Fortschritts der Optik standen.

Die Fraunhofer'schen Beobachtungen der dunklen Linien im Sonnenspectrum, sowie der hellen Linien im Lampenlicht regten zu weiteren Beobachtungen an. Herschel[2]) beschrieb 1822, 1827 und 1829[3]) die Flammen verschiedener, brennender Körper. In der letzteren Abhandlung heisst es: „Die Flamme von Cyangas, durch ein Prisma gesehen, giebt ein Spectrum, das auf eigene Weise durch mehrere dunkle und breite Linien getheilt ist. Die Flamme von salpetersaurem Strontian hat zwei brillante Nuancen in Roth; das Spectrum hat sehr scharfe Grenzen, und das Merkwürdigste ist die Bildung einer sehr leuchtenden, klaren, blauen Linie, die ganz verschieden von den übrigen ist. Auch Kalium, wenn es in Jodgas brennt, giebt ein Spectrum von einer eigenen bemerkenswerthen Form." Talbot beschreibt einige Jahre später die

---

[1]) Theorie der doppelten Strahlenbrechung, Pogg. Ann. XXV, S. 418, 1832. Franz Ernst Neumann, geboren am 11. September 1798 in der Ukermark, habilitirte sich 1826 in Königsberg und wurde dort 1828 Professor der Physik und Mineralogie. Seine Vorlesungen über mathematische Physik, die sich durch Klarheit und, bei aller mathematischen Knappheit und Bestimmtheit, durch einen Reichthum an allgemeinen Ideen auszeichnen, werden soeben von seinen Schülern nach Collegienheften herausgegeben.

[2]) John Frederick William Herschel, Sohn von Friedr. Wilh. Herschel, wurde am 7. März 1798 in Slough bei Windsor geboren und starb am 12. Mai 1871 in Collingwood bei Hawkhurst. Er lebte meist als Privatmann in London mit astronomischen, physikalischen, meteorologischen etc. Arbeiten beschäftigt.

[3]) Edinb. Phil. Trans. 1822. Encyclop. Metrop., Artikel Light 1827. Bull. des Sciences 1829, auch Pogg. Ann. XVI, S. 186, 1829.

Spectren künstlicher Flammen noch bestimmter [1]): „Strontian- und Lithiumflammen sind bei Lampenlicht mit freiem Auge nicht zu unterscheiden; durch ein Prisma betrachtet zeigt die Strontianflamme ausser einem rothgelben und einem scharf hellblauen Strahl eine grosse Anzahl rother Strahlen, die alle durch dunkle Zwischenräume getrennt sind. In der Lithiumflamme dagegen ist das Roth ungetheilt.“ „Danach zögere ich nicht zu behaupten, dass die optische Analyse die kleinsten Mengen dieser Stoffe mit ebenso viel Genauigkeit unterscheiden kann, als irgend eine andere bekannte Methode.“ Indessen sind diese Ideen weniger bestimmt und vor allem weniger allgemein, als sie klingen. Kirchhoff kommt in einem Aufsatz „Zur Geschichte der Spectralanalyse“ [2]) zu dem Schluss, dass die Arbeiten Herschel's, wie auch Talbot's jedenfalls nicht die strenge Abhängigkeit jener Linien von dem betreffenden Element in der Flamme nachweisen, und man muss diesem Schluss wohl beistimmen, wenn man beachtet, dass Talbot die helle Linie im Gelben ebensowohl dem Schwefel, wie den Natronsalzen zuschreibt. Aehnliches gilt auch von den Versuchen Wheatstone's [3]), der den elektrischen Funken zwischen verschiedenen Metallen überspringen liess und das Spectrum dieses Funkens für dieselben Metalle charakteristisch fand. Mehr Aufsehen als diese Beobachtungen erregte die Entdeckung Brewster's von der Nachahmung der Fraunhofer'schen Linien in künstlichem Lichte, die er im Juni 1832 der Britischen Naturforscher-Versammlung in Oxford mittheilte. William Hallows Miller wiederholte diese Versuche und beschrieb dieselben noch vor Brewster [4]). Brewster selbst beobachtete im Spectrum des Lichtes, dass durch salpetrigsaures Gas gegangen, über 2000 solcher schwarzen Linien und leitete dieselben aus einer auswählenden Absorption des Gases ab. Die Fraunhofer'schen Linien, deren er auch im Spectrum des Sonnenlichtes über 2000 zählte, charakterisirte er ebenfalls als Absorptionslinien, entstanden durch die Absorption des Lichtes in der Atmosphäre unserer Erde, oder vielleicht auch in der Atmosphäre der Sonne. Dass die Fraunhofer'schen Linien wirklich von dem Zustande unserer Atmosphäre abhängig seien, konnte Brewster nachweisen; eine Abhängigkeit derselben vom Zustande der Sonnenatmosphäre aber vermochte Forbes bei der ringförmigen Sonnenfinsterniss vom 15. Mai 1836 nicht zu entdecken [5]). Wrede [6]) ging auch in der Erklärung der schwarzen Linien

Optik, c. 1830 bis c. 1840.

[1]) Phil. Mag. (3) IV, 1834; Pogg. Ann. XXXI, S. 592, 1834, auch ein Aufsatz Talbot's in Brewster's Journal of Science V, 1826 beschäftigt sich schon mit Spectralerscheinungen. William Henry Fox Talbot (geboren 1800), Erfinder der Photographie auf Papier, lebte als reicher Privatmann.

[2]) Kirchhoff, gesammelte Abhandlungen, Leipzig 1882, S. 625 bis 641.

[3]) Report of the British Association f. 1835; Pogg. Ann. XXXVI, S. 148, 1835.

[4]) Phil. Mag. (3) II, 1833; Pogg. Ann. XXVIII, S. 386 und XXXII, S. 128, 1833 und 1834.

[5]) Phil. Mag. (3) IX, 1836.

[6]) Kongl. Vet. Acad. Handl. 1834; Pogg. Ann. XXXIII, S. 353, 1834.

Optik, c. 1830 bis c. 1840.

gänzlich von Brewster ab. „Wenn die Körper“, sagt er, „aus Atomen bestehen, die in bestimmter Entfernung von einander gehalten werden, so muss an den einzelnen Atomen eine partielle Reflexion stattfinden, dadurch kann eine Reihe von Lichtwellensystemen entstehen, von denen jedes eine geringere Intensität hat und von denen jedes um ein gewisses retardirt ist. Die Interferenz dieser Wellen kann dann jene schwarzen Linien hervorrufen.“ Brewster aber benutzte seine Absorptionslinien vor allem als Waffe gegen die Undulationstheorie. Nachdem er darauf aufmerksam gemacht, dass dieser Theorie noch immer die Erklärung der Dispersion fehle, sagt er weiter: „Wenn wir Licht durch eine sehr dünne Schicht dieses (salpetrigsauren) Gases gehen lassen, so giebt es nicht weniger als 2000 verschiedene Portionen des einfallenden Bündels, welchen das Gas den Durchgang durchaus verweigert, während es andere 2000 Portionen ungehindert hindurchlässt; und was ebenso seltsam ist, derselbe Körper übt im flüssigen Zustande keine solche Kraft aus, sondern lässt alle jene 2000 Portionen, welche das Gas zurückhält, frei hindurchgehen. In der Flüssigkeit undulirt also der Körper mit Leichtigkeit für alle Strahlen; in dem Gas dagegen, wo wir glauben sollten, der Aether wäre darin in einem viel freieren Zustande vorhanden, hat derselbe nicht die Macht, die Undulationen von 2000 Portionen hindurchzulassen[1]).“ Damit hält dann Brewster den schon früher angeführten, emphatischen Ausruf von dem neuen Altar (der Undulationstheorie), vor dem er nicht niederknien möchte, für genügend begründet[2]). So wenig Brewster aber mit diesem Angriff Glück hatte, so wenig trug seine Charakterisirung der Fraunhofer'schen Linien als Absorptionslinien Frucht. Das Vage des ganzen Gedankens liess kein Ziel des Fortschritts erkennen, und die Spectraluntersuchungen, statt nun erst zu beginnen, schlossen vielmehr für längere Zeit ab.

Mit anderen Zielen, nicht auf die Qualität, sondern auf die Quantität gerichtet, untersuchte Wollaston das Licht der Himmelskörper[3]). Wollaston benutzte dieselbe photometrische Methode, welche Graf Rumford um das Jahr 1813 in Gilbert's Annalen (Bd. XLV, S. 341, 1813 und XLVI, S. 230, 1814) beschrieben. Er liess das Sonnenlicht durch ein zirkelrundes Loch in ein dunkles Zimmer fallen und von einem Stabe einen Schatten werfen. Dann wurde ein Wachslicht angezündet und so gestellt, dass der von ihm verursachte Schatten des Stabes gerade so stark wurde, als der von dem Sonnenlichte herrührende. Ebenso verfuhr er beim Mondlichte. Nach dem mittleren Resultat vieler Versuche war das Sonnenlicht dem Lichte von 5563 Wachskerzen in 1 Fuss Entfernung gleich. Das Licht des Vollmonds fand Wollaston nur gleich $^1/_{144}$ Wachskerzen in 1 Fuss Entfernung; das Sonnenlicht ist also 801072 mal stärker als das Mondlicht. Ausserdem berechnete Wollaston, dass der Mond

1) Pogg. Ann. XXVIII, S. 385, 1833; nach Phil. Mag. (3) II. p. 360.

2) Ibid., S. 381.

3) Phil. Trans. 1829; Pogg. Ann. XVI, S. 329, 1829.

Optik, c. 1830 bis c. 1810.

ungefähr $1/8$ des auf ihn fallenden Lichtes reflectirt. Das Licht der Fixsterne war auf diese Art nicht zu bestimmen. Wollaston stellte darum die Kugel eines Quecksilberthermometers so auf, dass sie das Licht einer Wachskerze in derselben Stärke wie das Licht des Fixsterns reflectirte. Er meint zwar selbst, dass dieses Mittel keiner Genauigkeit fähig, macht aber auf die Wichtigkeit der Untersuchungen aufmerksam und giebt dann an, dass das Licht des Sirius zu dem der Sonne sich verhalte wie 1 zu 20000 Millionen, wenn nämlich angenommen werden dürfe, dass bei der Reflexion an der Thermometerkugel die Hälfte des Sonnenlichtes verloren gehe. Mit photometrischen Messungen beschäftigten sich um diese Zeit auch Ritchie[1]) u. A. Ritchie versuchte um 1825 das Leslie'sche Differentialthermometer wieder zu einem Photometer zurecht zu machen, ging aber später um das Jahr 1829 zur Construction eines eigenen Photometers über, das unter seinem Namen in den Lehrbüchern der Physik beschrieben ist. Indessen litt das letztere nicht weniger an der Unsicherheit der subjectiven Beurtheilung der Beleuchtung durch das Auge, als das Rumford'sche Photometer. Drummond benutzte bei seinen photometrischen Messungen der Sicherheit wegen sowohl das Rumford'sche Photometer, wie das von Ritchie. Die Lichtstärke seines Kalklichtes (beschrieben in den Phil. Trans. für 1826) fand er danach, wenn er die einer Argand'schen Lampe gleich 1 setzte, zu 264,1 Einheiten.

Mit der Theorie des Auges selbst waren Optiker, physikalische wie physiologische, gerade sehr stark beschäftigt. Gauss[2]) vereinfachte die Darstellung der Brechung von Lichtstrahlen durch Systeme von sphärischen Flächen, indem er die Abstände der leuchtenden Punkte, wie der Brennpunkte nicht mehr auf die Scheitel der brechenden Flächen, sondern auf ein Paar anderer Punkte bezog, die er Hauptpunkte nannte. Hauptpunkte sind dabei diejenigen Punkte, für welche Bild und Gegenstand an Grösse identisch werden. Unter Benutzung dieser Punkte erhalten die Formeln, welche den Zusammenhang zwischen leuchtenden Punkten und Bildpunkten angeben, auch für Systeme von sphärischen Flächen dieselbe einfache Gestalt, welche sie bei Annahme einer brechenden Fläche zeigen.

Plateau[3]) beschäftigte sich sehr eingehend mit der Irradiation des Auges. Er bewies, dass diese manchmal angezweifelte Unvollkommenheit des Auges wirklich besteht, stellte experimentell ihre Gesetze fest und kam damit zu dem Schluss: „Die wahrscheinlichste Ursache der Irradiation scheint die jetzt allgemein angenommene zu sein, nämlich, dass der durch das Licht erzeugte Reiz sich auf der Netzhaut ein wenig über

[1]) William Ritchie († 15. September 1837 Portobello b. Edinburgh), zuerst Geistlicher, dann Physiker und Professor a. d. Royal Institution.

[2]) Dioptrische Untersuchungen, Abhandl. der Königl. Gesellschaft der Wissensch. zu Göttingen I, 1838 bis 1841.

[3]) Mém. de l'acad. Brux. XI, 1839; Pogg. Ann. Ergänzungsband I, S. 79, 193, 405, 1839.

Optik, c. 1830 bis c. 1840.

den Umriss des Bildes hinaus fortpflanzt [1]." Doch blieb diese Ansicht nicht ohne Widerspruch. Arago [2]) meinte, dass die Irradiation wohl von einer unvollkommenen Achromasie des Auges herrühren könne, und Wrede [3]) hielt auch diese Erscheinung für ein Beugungsphänomen.

Seebeck [4]) untersuchte viele Personen auf einen „Mangel an Farbensinn". 60 Papierstreifen, die mit den verschiedensten Farbentönen gefärbt waren, mussten genau unterschieden werden. Er fand 13 Personen, die das nicht vermochten; doch zeigte sich bei allen noch die sicherste Empfindung für Gelb, Roth und Blau wurden meistens verwechselt.

Wheatstone [5]) bewies zum ersten Mal, dass das Sehen mit beiden Augen, die Verschiedenheit der beiden in ihnen entstehenden Bilder, das körperliche oder räumliche Sehen bedingt und auch bei der Beurtheilung der Entfernung des angeschauten Gegenstandes mitwirkt. Der Apparat, welchen er zum Beweis benutzte, war das bekannte Spiegelstereoskop. Das Linsenstereoskop und zugleich eine photographische Kammer zum Aufnehmen stereoskopischer Bilder beschrieb Brewster 10 Jahre später im Jahre 1849 [6]). Doch hatte Moser schon 1841 für das Wheatstone'sche Stereoskop die Aufnahme der Bilder statt durch Handzeichnung durch die Camera obscura empfohlen und Anweisung dafür gegeben [7]).

Das photographische Verfahren selbst war erst im Jahre 1839, nachdem die französische Regierung von den Erfindern durch eine Rente das Recht der Veröffentlichung erkauft, durch Arago bekannt gegeben worden [8]). Eine historische Einleitung des letzteren giebt folgende Daten über die Erfindung. „Der Erste, welcher Versuche zur Herstellung photographischer Bilder machte, war Charles, der sich aber darauf beschränkte, auf einem mit Chlorsilber überzogenen Papiere durch das directe Sonnenlicht Silhouetten herzustellen." Vollständigere Versuche gaben 1802

---

[1]) Pogg. Ann., Ergzbd. I, S. 441.

[2]) Comptes rendus 1839.

[3]) Bericht über die Fortschritte der Physik und Chemie XX, S. 24 bis 25, 1840. Baron Fabian Jacob Wrede (geboren 9. October 1802 in Linköping), Chef des schwedischen Artilleriestabes, seit 1835 Mitglied der Akademie der Wissenschaften zu Stockholm.

[4]) Pogg. Ann. XLII, S. 177, 1837.

[5]) Phil. Trans. 1838; Pogg. Ann. Ergzbd. I, 1839. Nach Wheatstone (Pogg. Ergzbd. I, S. 5) hat überhaupt Niemand vor ihm auf die Verschiedenheit der beiden Bilder eines angeschauten Gegenstandes in beiden Augen aufmerksam gemacht. Nur Leonardo da Vinci betonte in seinem Trattato della Pittura, dass zwei Augen in $A$ und $B$ hinter einem Körper $C$ mehr sähen als ein einziges, dass also beim Sehen mit zwei Augen das Object $C$ gleichsam durchsichtig gesehen werde, den Augen $A$ und $B$ bleibe nur der den leuchtenden Punkten $A$ und $B$ gemeinsame Schatten verborgen.

[6]) Rep. of the British. Ass. XIX, 1849.

[7]) Dove, Repertorium d. Physik V, S. 385, 1841.

[8]) Compt. rend. 1839; Pogg. Ann. XLVIII, S. 193, 1839. Poggendorff rechtfertigt da die Veröffentlichung des Artikels mit den merkwürdigen Worten: „Bei dem allgemeinen, und man kann wohl sagen, übertriebenem Interesse, welches die Anzeige von Herrn Daguerre's Entdeckung im Publicum gefunden hat ..."

Optik, c. 1830 bis c. 1840.

Wedgewood und danach Davy; aber ihre Versuche, die Bilder der Camera obscura zu fixiren, sowie die Copien von Gemälden etc. gegen die weiteren Einwirkungen des Lichtes zu schützen, misslangen gänzlich. Niepce der Aeltere scheint seine Versuche schon 1814 begonnen zu haben; 1826 erfuhr er zufällig, dass auch Daguerre sich mit ähnlichen Arbeiten beschäftigte, 1829 wurde zur Vorvollkommnung der Erfindung ein Gesellschaftsvertrag zwischen ihnen abgeschlossen. Niepce starb im Jahre 1833. Daguerre kam 1835 zur definitiven Gestaltung des nach ihm benannten Verfahrens der Daguerreotypie. Die Herstellung der Photographien auf Papier beschrieb Talbot zuerst im Jahre 1839[1]), wollte aber schon 1834 dieselben erfunden haben. Negative auf Glas fertigte Niepce de St. Victor im Jahre 1848. Die Chemiker hatten danach viel zu thun mit der Erklärung der bei der Photographie stattfindenden Vorgänge; die Physiker aber bemühten sich, die Lichtstrahlen zu finden, welche die stärksten Wirkungen äussern, und die durchsichtigen Stoffe zu entdecken, welche diese Strahlen am wenigsten absorbiren. Auf ersterem Gebiete war vor allem Herschel thätig[2]); doch hatte Bérard schon lange vor Erfindung der Photographie bewiesen[3]), dass die chemischen Strahlen ihre grösste Intensität am violetten Ende des Spectrums hätten und dass sie sich selbst, wie schon Wollaston und Ritter behauptet, etwas über dieses Ende hinaus erstreckten. Biot[4]) aber hatte daraus geschlossen, dass es Strahlen von sehr verschiedener Brechbarkeit gäbe, von denen die am wenigsten brechbaren das Gefühl von Wärme erregen, die am meisten brechbaren chemische Wirkungen ausüben, während nur die Strahlen von mittlerer Brechbarkeit den Eindruck von Licht in uns hervorrufen. Biot versuchte auch im Jahre 1839[5]) die Absorptionskraft verschiedener Substanzen für die chemischen Strahlen zu bestimmen. Er constatirte durch Untersuchung von Scheiben aus Glas, Steinsalz, Bergkrystall etc., dass das Absorptionsvermögen dieser Stoffe für chemische Strahlen von deren Absorptionsvermögen für Licht und Wärme ganz unabhängig ist, und dass die chemisch am stärksten wirkenden Strahlen auch am stärksten die Phosphorescenz erregen. Becquerel, der theils mit Biot, theils mit seinem Sohne die Versuche fortsetzte, entdeckte, dass Bergkrystall für die chemischen Strahlen besonders durchlässig sei, und dass selbst ein dunkler Bergkrystall mehr von diesen Strahlen durchlasse als eine helle Glasscheibe.

---

[1]) Some account of the art of photogenic drawing, London 1839. In Pogg. Ann. XLVIII, S. 220, 1839 ist das photographische Papier beschrieben.

[2]) On the chemical action of the rays of the solar spectrum on preparations of silver (Phil. Trans. 1840); On the action of the rays of the solar spectrum on vegetable colours, Phil. Trans. 1842.

[3]) Mém. sur les propriétés des diff. espèces de rayons, Mém. d'Arcueil III, 1817.

[4]) Lehrbuch der Experimentalphysik IV, S. 247 bis 248, Leipzig 1825.

[5]) Comptes rendus 1839.

Optik, c. 1830 bis c. 1840.

Vor diesen Untersuchungen noch aber hatte man vom Lichte auch eine direct magnetisirende Wirkung behauptet. Morichini[1]), Mrs. Somerville[2]) u. A. wollten bemerkt haben, dass eine Stahlnadel unter dem Einfluss der Lichtstrahlen, hauptsächlich der violetten, magnetisch werde. Auch Zantedeschi[3]) glaubte 1829 solche magnetisirende Wirkungen der violetten Strahlen ganz sicher zu beobachten. Moser und Ries[4]) aber, wie auch Seebeck, konnten bei den sorgfältigsten Versuchen keine Wirkung des Lichtes auf ganz unmagnetisches Eisen entdecken. Ebensowenig wie jene Beobachtungen bestätigten sich dann die späteren Angaben Matteucci's, dass die Goldblättchen eines Elektrometers im Sonnenlichte sich abstossen und dass eine Glasscheibe im Sonnenschein nach kurzer Zeit elektrisch wird. Die Täuschungen bei allen diesen falschen Angaben wurden wohl meist hervorgerufen durch Luftströmungen, die von den Wärmestrahlen verursacht werden.

Schliesslich können wir noch der Construction einiger kleinerer optischer Apparate hier erwähnen. Das Kaleidoskop, welches Brewster 1817 sich hatte patentiren lassen und das einige Zeit danach in allen Händen gewesen war, hatte um diese Zeit schon an Interesse verloren. Aufsehen erregten eben die stroboskopischen Scheiben, die Stampfer 1834 im Jahrb. des Wiener polytechnischen Instituts (Bd. XVIII) beschrieb. Plateau nahm die Priorität dieser Entdeckung für sich in Anspruch, da er die Idee zu jenen Scheiben schon im Jahre 1833 (Juniheft der Corr. math. et phys. de l'Observatoire de Bruxelles) gegeben. Berzelius aber ist in seinem Berichte über die Fortschritte der Physik und Chemie (Bd. XIV, S. 22) dieser Reclamation nicht günstig, da er solche Scheiben schon Anfang August des Jahres 1833 in Stockholm gesehen. Das Rad, welches dieselben Erscheinungen, wie die stroboskopischen Scheiben, aber ohne Spiegel und mehrere Personen zu gleicher Zeit zeigt, beschrieb W. G. Horner unter dem Namen Dädaleum in dem Philosophical Magazine (Bd. IV) auch noch im Jahre 1834. Einen schweren Kreisel zum Auflegen verschiedenfarbiger Scheiben und damit zum Herstellen von Farbenmischungen erfand Busolt[5]) ebenfalls in diesem Jahre. Der Kreisel, aus Metall gefertigt, wog 5 Pfund und konnte auf einer Porcellanplatte durch einmaliges Anreissen 45 Minuten in Rotation erhalten werden.

---

[1]) Sopra la forza magnetizzante del lembo estremo del raggio violetto, Rom 1812. Gilbert's Annalen XLIII, S. 212, 1813.

[2]) On the magnetizing power of the more refrangible solar rays (Phil. Trans. 1826). Poggendorff's Annalen VI, S. 493, 1826.

[3]) Bibl. univ. XLI, p. 64; Poggendorff's Ann. XVI, S. 187, 1829.

[4]) Poggend. Ann. XVI, S. 563, 1829.

[5]) Pogg. Ann. XXXII, S. 656, 1834.

Verlag von Friedrich Vieweg & Sohn in Braunschweig.

---

# Ueber die Genesis wissenschaftlicher Entdeckungen und Erfindungen.

Ein Vortrag, gehalten im Verein akademisch gebildeter Lehrer zu Frankfurt a. M.

von **Dr. Ferd. Rosenberger.**

gr. 8. geh. Preis 80 ₰

---

# Vorträge und Reden

von **Hermann von Helmholtz.**

(Zugleich dritte Auflage der „Populären wissenschaftlichen Vorträge“ des Verfassers.)

**Zwei Bände.** Mit Holzstichen. gr. 8. geh. Preis 12 ℳ.

Gebunden. Preis 13 ℳ. 25 ₰

**Inhalt:**

Ueber Goethe's naturwissenschaftliche Arbeiten (1853). — Zusatz. — Ueber die Wechselwirkung der Naturkräfte und die darauf bezüglichen neuesten Ermittelungen der Physik (1854). — Anhang: Robert Mayer's Priorität. — Berechnungen. — Ueber die physiologischen Ursachen der musikalischen Harmonie (1857). — Ueber das Verhältniss der Naturwissenschaften zur Gesammtheit der Wissenschaften. Akademische Festrede (1862). — Ueber die Erhaltung der Kraft (1862). — Eis und Gletscher (1865). — Zusätze. — Die neueren Fortschritte in der Theorie des Sehens (1868). — I. Der optische Apparat des Auges. — II. Die Gesichtsempfindungen. — III. Die Gesichtswahrnehmungen. — Ueber das Ziel und die Fortschritte der Naturwissenschaft. Eröffnungsrede für die Naturforscherversammlung zu Innsbruck (1869). — Ueber das Sehen des Menschen (1855). — Ueber den Ursprung und die Bedeutung der geometrischen Axiome (1870). — Zusatz: Mathematische Erläuterungen. — Zum Gedächtniss an Gustav Magnus (1871). — Ueber die Entstehung des Planetensystems (1871). — Optisches über Malerei (1871 bis 1873). — I. Die Formen. — II. Helligkeitsstufen. — III. Die Farbe. — IV. Die Farbenharmonie. — Wirbelstürme und Gewitter (1875). — Das Denken in der Medicin (1877). — Anhang. — Ueber die akademische Freiheit der deutschen Universitäten (1877). — Die Thatsachen in der Wahrnehmung (1878). — Beilagen: I. Ueber die Localisation der Empfindungen innerer Organe. — II. Der Raum kann transcendental sein, ohne dass es die Axiome sind. — III. Die Anwendbarkeit der Axiome auf die physische Welt. — Die neuere Entwickelung von Faraday's Ideen über Elektricität (1881). — Anhang: I. Berechnung der elektrostatischen Wirkung der elektrolytischen Ladungen von einem Milligramm Wasser. — II. Ueber ungesättigte Verbindungen. — Ueber die elektrischen Maasseinheiten nach den Berathungen des elektrischen Congresses, versammelt zu Paris 1881. — Zusatz. — Kritisches: I. Induction und Deduction. Vorrede zum zweiten Theile des ersten Bandes der Uebersetzung von W. Thomson's und Tait's „Treatise on Natural Philosophy“ (1873). — II. Ueber das Streben nach Popularisirung der Wissenschaft. Vorrede zur Uebersetzung von J. Tyndall's „Fragments of Science“ (1874). — Kritische Beilage: Zöllner contra Tyndall.

---

# Handbuch der mechanischen Wärmetheorie.

Unter theilweiser Benutzung von É. Verdet's Théorie Mécanique de la Chaleur von

**Dr. Richard Rühlmann,**

Professor am Königlichen Gymnasium zu Chemnitz.

**Zwei Bände.** Mit zahlreichen Holzstichen. gr. 8. geh. Preis 46 ℳ.

---

# Die Lehre von der Elektricität

von **Gustav Wiedemann.**

Zugleich als dritte völlig umgearbeitete Auflage der Lehre vom Galvanismus und Elektromagnetismus.

Mit zahlreichen Holzstichen und zwei Tafeln. gr. 8.

4 Bände broschirt 108 ℳ., in Callico geb. 113 ℳ.

Verlag von Friedrich Vieweg & Sohn in Braunschweig.

## Müller-Pouillet's
# Lehrbuch der Physik und Meteorologie.

Bearbeitet von

**Dr. Leop. Pfaundler,**

Professor der Physik an der Universität Innsbruck.

**Drei Bände.** Mit gegen 2000 Holzstichen, Tafeln, zum Theil in Farbendruck, und einer Photographie. gr. 8. geh.

I. Band. Mechanik, Akustik. Neunte Auflage. Preis 12 *M.*
II. Band. Optik, Wärme. Achte Auflage. Preis 19 *M.* 40 *Pf.*
III. Band. Elektr. Erscheinungen. Achte Auflage. Preis 12 *M.*

---

## Vorlesungen
# über die Wellentheorie des Lichtes.

Von **É. Verdet.**

Deutsche Bearbeitung von

**Dr. Karl Exner.**

**Zwei Bände.** Mit Holzstichen. gr. 8. geh. Preis 26 *M.*

---

# Fünf populäre wissenschaftliche Vorträge

gehalten in der Aula der Herzoglichen technischen Hochschule zu Braunschweig von

**Dr. Heinrich Weber,**

Professor der Physik an der Herzogl. technischen Hochschule.

Mit 84 Illustrationen. 8. geh. Preis 2 *M.* 50 *Pf.*

Inhalt: Uebersicht über die Entstehung und die Wirkungen des galvanischen Stromes. — Telegraphie und Telephonie. — Elektromagnetische, magnetelektrische und Dynamo-Maschinen. — Galvanoplastik und elektrisches Licht. — Ueber das Perpetuum mobile.

---

# Naturkundliche Volksbücher.

Allen Freunden der Natur gewidmet von

**L. Busemann,**

Lehrer an der städtischen Volksschule in Emden.

**Zwei Bände,** die in 25 Lieferungen (à ca. 4 Bogen) zum Preise von 60 *Pf.* pro Lieferung erschienen sind. Mit 537 Holzstichen. gr. 8. geh.

Der Preis dieses 102 Bogen umfassenden Werkes, der ein sehr wohlfeiler genannt zu werden verdient, beträgt **15** *M.*

---

# Die Spectralanalyse

in einer Reihe von sechs Vorlesungen mit wissenschaftlichen Nachträgen von **H. E. Roscoe.**

Autorisirte deutsche Ausgabe, bearbeitet von

**Carl Schorlemmer.**

**Zweite vermehrte Auflage.** Mit 80 Holzstichen, Chromolithographien, Spectraltafeln etc. gr. 8. geh. Preis 9 *M.*

3.

# Dritter Abschnitt der Physik in den letzten hundert Jahren.

Von circa 1840 bis circa 1860.

---

## Einführung des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft.

Zeiten kritischer Resignation und hoffnungsvollen Vertrauens auf die Macht des menschlichen Geistes wechseln im Leben der Wissenschaften beständig mit einander ab und sind mit dem Vergehen und Werden wissenschaftlicher Systeme eng verbunden. Das Altern und das Absterben dogmatisch gewordener Anschauungen bringen immer die Zweifelsucht und den Skepticismus hervor, die mit dem folgenden Siege neuer, jugendlich fruchtbarer Theorien immer wieder zu der natürlichen Sicherheit in den realen Werth des wissenschaftlichen Denkens zurückführen. Eine Alleinherrschaft wird dabei keine der beiden Richtungen, wenigstens nicht für längere Zeit, behaupten können, vielmehr werden in den meisten Zeiten, zufolge der verschiedenen Anlagen, Neigungen und Beschäftigungen der wissenschaftlichen Arbeiter, die entgegengesetzten Richtungen mehr oder weniger unvermittelt neben einander herlaufen; nur ein stärkeres oder schwächeres Ueberwiegen der einen oder der anderen wird nach der jeweiligen Entwicklung der Wissenschaft hervortreten, und in den Uebergangsepochen werden beide sich oft die Wage halten.

Einen solchen Uebergangscharakter zeigt auch die neueste Physik, vor Allem in den verschiedenen Schätzungen ihrer methodischen Factoren, in den entgegengesetzten Anschauungen über den objectiven, realen Werth ihrer hypothetischen Deductionen.

Bis zum Beginne der vorigen Periode schien man darüber einig geworden zu sein, dass jeder physikalischen Disciplin eine besondere elementare Materie zu Grunde gelegt werden müsse, und dass jede solche Disciplin nur als die Lehre von den Kräften einer eigenthümlichen Materie definirt und damit von den anderen Disciplinen wohl getrennt werden könnte. In leicht übersichtlicher und wohlgeordneter Systematik erklärte man danach die Mechanik als die Lehre von der ponderablen Materie, die Optik als die Lehre vom Lichtstoff, die Wärmelehre hatte zur Grundlage den Wärmestoff, wie die Lehre von dem Magnetismus und der Elektricität sich nur auf die magnetischen und auf die elektrischen Flüssigkeiten bezogen. Dieser Anschauung gegenüber bedeutete der Sieg der Undulationstheorie des Lichts in der vorigen Periode nicht bloss den Umsturz einer speciellen optischen Theorie, sondern musste vielmehr gleichzeitig als ein Angriff auf das geltende wissenschaftliche System in seiner Gesammtheit empfunden werden. Mit der Annahme der Undulationstheorie war die Optik vollständig aus dem Kreise der anderen physikalischen Disciplinen herausgetreten, denn ihr Gebiet wurde nun nicht mehr durch eine specielle Materie mit einer besonderen Kraft, sondern nur noch durch eine eigenthümliche Art der Bewegung des Aethers bezeichnet, einer Materie, die im Uebrigen mit dem Licht nichts weiter zu thun hatte und die anderen physikalischen Erscheinungen ebenso gut wie dem Lichte zu Grunde liegen konnte. Freilich hatte man schon seit den ältesten Zeiten eine andere physikalische Disciplin, die Akustik, von eben demselben Standpunkte aus behandelt; denn niemals hatte man für die Tonempfindungen, entsprechend dem Licht- und Wärmestoff, auch einen besonderen Tonstoff angenommen, sondern hatte stets die Schallerscheinungen nur als eine besondere Bewegungserscheinung der ponderablen Materie betrachtet. Auch hatten schon immer die Anhänger der Undulationstheorie des Lichts für ihre optischen Untersuchungen akustische Analogien zu Hülfe genommen, und Th. Young war bei seinen Arbeiten direct von solchen ausgegangen. Aber einerseits liess die lange Gewöhnung diese Instanz gegen die herrschende Anschauung ganz übersehen, und andererseits glaubte man auch die Akustik gar nicht als eine den anderen gleichberechtigte physikalische Disciplin anerkennen zu müssen, son-

dern dachte dieselbe nur als einen Appendix zur Mechanik ansehen zu dürfen. Dies Letztere war um so leichter, als man bis dahin die Tonempfindungen in der Physik noch kaum in Betracht gezogen und fast ausschliesslich die Entstehung der Töne und die Verbreitung des Schalles behandelt hatte. Richtiger wurden in ihrer principiellen Bedeutung die Angriffe gewürdigt, welche Rumford, Davy u. A. im Anfange dieses Jahrhunderts auf den Wärmestoff unternahmen, und die man sachlich auch nicht erfolgreich pariren konnte; diesen gegenüber machte man dann umgekehrt die Nothwendigkeit einer einheitlichen Auffassung der Naturerscheinungen geltend und nahm aus dem festen systematischen Gefüge der herrschenden Theorien scheinbar genügende Gründe für die reale Existenz der angezweifelten Materie.

Ein ähnliches Verfahren bei der neuen Lichttheorie einzuschlagen war nun allerdings nicht mehr möglich. Durch eine seltene Vereinigung von mathematischem Genie und erfinderischer Experimentirkunst war es gelungen, die Fundamente der Undulationstheorie so zu vervollständigen, dass sie bei keinem Problem mehr ganz versagte, die verwickeltsten Erscheinungen der Optik, die Beugung und die Polarisation des Lichtes mathematisch so genau zu entwickeln, dass die Hypothesen der Theorie tausendfach bewahrheitet wurden, ja endlich selbst optische Entdeckungen im Voraus zu berechnen, die mit astronomischer Sicherheit eintrafen. Die Emanationstheorie hatte ausgelebt, und der Lichtstoff war ohne Widerspruch aus dem Reiche des Existenten gestrichen. Damit war für jeden ernsthaften Physiker die Frage unumgänglich geworden, ob man nun die gewohnte Erklärungsart durch elementare Materien und deren Urkräfte ganz verlassen und alle die verschiedenen Naturerscheinungen auf eigenthümliche Arten der Bewegung zurückführen sollte, oder ob man nicht vielleicht fürderhin beide Erklärungsweisen als gleichberechtigt neben einander zulassen dürfte. Indessen hatte das Letztere schon insofern seine Schwierigkeiten, als die Imponderabilien doch mehr und mehr eine Tendenz zum Verschwinden zeigten. Noch in der vorigen Periode hatte Ampère durch seine elektromagnetische Theorie den magnetischen Flüssigkeiten die Realität abgesprochen, und wenn auch seine Hypothesen noch lange nicht die Sicherheit der Fresnel'schen Lichttheorien erreichten, so war doch durch dieselben

die Thatsache mindestens höchst wahrscheinlich gemacht, dass abermals eine specielle physikalische Disciplin statt auf eine besondere Materie auf eine besondere Art der Bewegung gegründet werden musste. Dazu kam, dass mit dem Ende der vorigen und dem Anfange dieser Periode auch die Wärmelehre zur Hälfte wenigstens dem alten Theorienkreise ganz entrissen und dem neuen erobert wurde. Melloni's wie Knoblauch's u. A. sehr ausgedehnte und sehr sorgfältige Untersuchungen bewiesen ohne jede Möglichkeit des Widerspruchs, dass die Wärmestrahlen in allen Beziehungen, die nicht direct die Grösse der Wellenlängen betreffen, den Lichtstrahlen vollkommen identisch sind und in Bezug auf Beugung, Reflexion, Refraction und Polarisation denselben so entsprechen, dass man die für die einen Strahlen entwickelten Formeln ohne Weiteres auf die anderen anwenden kann. Es konnte danach kein Zweifel darüber bleiben, dass die Wärmestrahlen durch dasselbe Medium wie die Lichtstrahlen, also durch den Aether, fortgepflanzt würden, und dass die strahlende Wärme wenigstens mit dem Wärmestoff nichts zu thun habe.

Freilich blieb auch die neue Theorie des Lichts selbst bei allen ihren Erfolgen nicht ohne erhebliche Schwierigkeiten, die noch dazu in dem unklaren Verhältniss zwischen dem Aether und der ponderablen Materie ihren tieferen Grund hatten. Zwar hatte dieselbe Unklarheit auch schon bei dem Lichtstoffe geherrscht, aber dieselbe trat nun in der neuen, durchsichtigeren Theorie mehr als früher hervor. Wie man sich mit der Erklärung der Dispersion des Lichts noch ohne ganz durchschlagenden Erfolg abmühte, haben wir schon in der vorigen Periode erwähnt, grössere Schwierigkeiten blieben noch bei der Polarisation zu überwinden. Fresnel hatte angenommen, dass die Schwingungen des polarisirten Lichtes senkrecht zur sogenannten Polarisationsebene stattfänden, Neumann aber war danach bei seiner Erklärung dieser Erscheinungen von der gerade entgegengesetzten Annahme ausgegangen. Die Frage wurde viel ventilirt, jedoch so wenig entschieden, dass man bei einer Abstimmung über dieselbe vielleicht noch heute nur Stimmengleichheit auf beiden Seiten erreichen würde. Ebenso hatte Fresnel zur Erklärung der Reflexion des Lichts an durchsichtigen Körpern angenommen, dass die Zurückwerfung an einer Ebene geschehe; Jamin u. A. zeigten nun, dass

die hierdurch bedingten Polarisationszustände bei den reflectirten Strahlen in Wirklichkeit nicht genau statthätten. Dadurch verloren dann auch die Fresnel'schen Formeln für die Intensitäten der reflectirten und gebrochenen Strahlen ihre strenge Gültigkeit, und Cauchy bemühte sich, unter der Voraussetzung eines momentanen Auftretens von Longitudinalwellen in der Nähe der Reflexionsfläche neue, besser stimmende Werthe abzuleiten. Einerseits aber konnten auch diese Formeln, weil die Absorption des Lichtes dabei nicht berücksichtigt wurde, nur als Näherungsformeln gelten, und anderseits meinte man, auch die Cauchy'sche Annahme noch durch eine andere, wahrscheinlichere ersetzen zu müssen, die jedoch den Ableitungen vollständige Sicherheit auch nicht gewährte. In der Theorie der Aberration des Lichtes fand man neue Schwierigkeiten, weil man nach der Undulationstheorie nicht mehr ohne Weiteres die vollständige Unabhängigkeit der Lichtbewegung durch einen durchsichtigen Körper von der Eigenbewegung dieses Körpers anzunehmen vermochte. Indessen zeigten die Versuche von Fizeau doch sehr bald, dass jene Annahme auch nach der Undulationstheorie noch unbedenklich sei, und die sich hieran anschliessenden Messungen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in der Luft, in Flüssigkeiten und in festen Körpern führten sogar zu einem experimentellen Entscheide gegen die Emanations- und für die Undulationshypothese. Endlich sprach auch die in der Optik immer stärker werdende Benutzung akustischer Analogien und deren unleugbare Fruchtbarkeit in deutlicher Sprache für den Werth der kinetischen Behandlungsweise der physikalischen Probleme. Zwar die Phosphorescenz, deren Betrachtung man sich nun wieder lebhaft zuwendete, war auch für die Emanationstheorie kein ungünstiges Phänomen gewesen, die damit in unleugbarem Zusammenhange stehende Fluorescenz aber wurde erst unter der Herrschaft der Undulationstheorie in ihrer wahren Bedeutung erkannt, und ihre Gesetze wurden erst mit Hülfe dieser Theorie aufgestellt. Auch Doppler's Entdeckung von der Aenderung der Farbe durch die Bewegung des Licht aussendenden oder Licht empfangenden Körpers konnte nur auf dem Boden der Undulationstheorie entstehen und erwies sich für diese Periode sogar noch als eine verfrüht reife Frucht. Schliesslich zeigte auch die gerade in diesem Zeitraume rasch aufblühende

physiologische Optik, dass selbst für die Theorie der Lichtempfindung die Annahme eines Lichtstoffes mit besonderen sinnlichen Kräften nicht nothwendig sei.

Leider wurden diese für die kinetische Betrachtungsweise der Naturerscheinungen so günstigen Momente durch die Misserfolge auf dem elektrischen Gebiete geradezu compensirt. Eine versuchte directe Uebertragung der Undulationstheorie auf die elektrischen Erscheinungen misslang gänzlich, und keine der charakteristischen Erscheinungen der Wellenbewegungen, die Reflexion, Refraction, Beugung, Interferenz u. s. f., konnte an der Elektricität wahrgenommen werden. Auch durch andere, nicht undulirende Bewegungen des Aethers die elektrischen Phänomene zu erklären, schien zur Zeit noch nicht möglich, und nur insofern konnte man sich einer Aethertheorie der Elektricität wenigstens annähern, als man mit Faraday auf die unitarische Theorie zurückgriff und dabei die Möglichkeit betonte, dass die angenommene einzige elektrische Flüssigkeit mit dem Aether wohl identificirt werden könnte. Doch benutzen trotzdem noch viele Physiker, deutsche und französische, und Physiko-Mathematiker besonders, die dualistische Theorie der Elektricität ihrer bequemen Anwendbarkeit wegen mit Vorliebe und ohne alle erkenntnisstheoretischen Skrupel.

Weniger Ursachen zu Neuerungen als jede andere physikalische Disciplin schien in diesem Zeitraume die Mechanik zu bieten, da ja der Umsturz zunächst nur die Imponderabilien betraf. Die Schwierigkeiten, welche sich bei der Behandlung rotirender Körper, und noch mehr bei der Untersuchung besonderer Bewegungen auf rotirenden Körpern zeigten, waren im Grunde nur mathematischer Art, und die Experimentalphysik feierte gerade durch die Behandlung solcher Probleme Triumphe auf einem Gebiete, von dem sie schon ziemlich ausgeschlossen erschien. Die Fall- und Wurfversuche, die Rotationsapparate, am meisten aber der Foucault'sche Pendelbeweis für die Umdrehung der Erde erweckten für die mechanischen Probleme ein so allgemeines Interesse, wie es denselben lange nicht mehr zu Theil geworden. Und doch musste nach und nach, wenn auch zuerst fast noch unmerklich, auch die Mechanik von der Umwandlung der Anschauungen mit ergriffen werden. Darauf deutete schon die immer mehr zunehmende Unsicherheit über die richtige Begründung der soge-

nannten mechanischen Principien hin, die sich in dieser Periode auch in ebenso zahlreichen als fruchtlosen Beweisen für das Parallelogramm der Kräfte äusserte. Directe, nicht zu übersehende Schwierigkeiten bot jedenfalls die Mechanik der Molecularkräfte. Für die Deduction der Bewegungserscheinungen ponderabler, endlicher Massen genügte der analytischen Mechanik die Newton'sche Kraftformel vollkommen, das zur Systembildung nothwendige repulsive Element hatte schon Newton echt kinetisch durch die Centrifugalkraft, d. i. die Beharrung der Bewegung, erklärt. Für die Molecularmechanik aber glaubte man, weil man auf eine Bewegung der Molecüle dabei nicht rechnete, ausser der Molecularattraction auch noch eine Molecularrepulsion annehmen zu müssen, von der man nur constatiren konnte, dass sie in einem viel stärkeren Verhältniss mit der Entfernung abnehmen müsse als die erstere. Indem man dann gezwungen wurde, diese abstossende Kraft mit der Repulsivkraft der Wärme vollkommen zu identificiren, machte man offenbar auch die Mechanik von dem Schicksal der Imponderabilien abhängig, was allerdings erst im nächsten Zeitraume durch die neue Theorie der Gase zu den nothwendigen Consequenzen führte. Aber selbst abgesehen hiervon zeigte die Molecularmechanik in sich noch immer eine Menge beunruhigender Elemente. Der Mathematiker versuchte in der Mechanik allerdings überall mit den erwähnten zwei entgegengesetzten Kräften auszukommen, die Physiker aber sahen sich gezwungen, bei Erklärung der Molecularerscheinungen noch andere, wenn auch nicht primitive, so doch abgeleitete einzuführen, deren Ableitung und Zurückführung auf die elementaren Kräfte entweder unklar blieb, oder auch gar nicht versucht wurde. Plateau's so grosses Aufsehen erregenden Versuche über die Eigenschaften von Flüssigkeitshäutchen, die immer bewunderte schnelle Ausbreitung von Flüssigkeiten auf einander, die eifrig beobachteten Capillarerscheinungen, die Diosmose und die Diffusion der Flüssigkeiten und Gase, die von Graham besonders erfolgreich behandelt wurden, die so grosse Hoffnungen erregenden Erscheinungen der Moser'schen Hauchbilder, die Absorption von Gasen durch Flüssigkeiten und feste Körper, die Auflösung der letzteren in Flüssigkeiten, alle diese Erscheinungen forderten und bestätigten die Zertheilung der Molecularattraction in zwei

verschiedene Kräfte, die Cohäsion und die Adhäsion. Wie aber diese Kräfte aus der allgemeinen Attraction abzuleiten und wie ihre Verschiedenheit bei den verschiedenen Körpern principiell zu erklären sei, darüber wagte man kaum zu sprechen. Dazu kamen noch andere Kräfte, die man nicht einmal auf Cohäsion und Adhäsion überall zurückbringen konnte. So die von Poisson eingeführte und jetzt immer mehr bestätigte Oberflächenspannung, die osmotische Kraft Graham's und die Viscosität, welch letztere sich nicht bloss in Flüssigkeiten, sondern auch in Gasen wirksam zeigte und die Erscheinungen hervorrief, die man wohl als eine innere Reibung bezeichnete, die man aber erst im nächsten Zeitraume mit voller Aufmerksamkeit verfolgte. Selbst die jetzt zum ersten Male gelingende Verflüssigung der Gase durch Druck passte mit ihrer Verwischung der festen Grenzen der Aggregatzustände nicht recht in den Rahmen der alten Physik.

So war der Zustand der Physik in dieser Periode nach und nach ein ziemlich chaotischer geworden. Neben der ponderablen Materie und den imponderablen elektrischen Flüssigkeiten, vielleicht auch noch einem imponderablen Wärmestoffe, hatte man noch den Aether, den man weder ponderabel noch imponderabel nennen mochte. Diese imponderablen Flüssigkeiten bewegten sich dann in einer Weise neben, gegen und durch einander, die nur durch eine gänzlich immaterielle Natur dieser Materien begreiflich werden konnte. Und dem Zwiespalt der Materien entsprach vollkommen der Dualismus der Kraftwirkung. Der ponderablen Materie wie den alten Imponderabilien waren Elementarkräfte zugeeignet, die unabhängig von dem Bewegungszustande der Stoffe unvermittelt in die Ferne wirkten; der Aether aber übte seine Kräfte nur durch Bewegungen aus, die von Ort zu Ort übertragen werden mussten und nie momentan, sondern immer nur mit einer endlichen Geschwindigkeit sich fortpflanzen konnten.

Das Alles schien einer Aenderung zu bedürfen, aber diese Aenderung herbeizuführen, zeigte sich noch schwerer als das Festhalten am Alten. Die Naturphilosophie existirte nach dem grossen Fiasco von Hegel als philosophische Wissenschaft nicht mehr, der Physiker selbst aber konnte direct nach dem Kampfe gegen die Philosophie sich so schnell nicht in einen Naturphilosophen umwandeln; eine Wissenschaft, welche die Einheit der An-

schauungen über Kraft und Materie als nothwendige Bedingung ihres Daseins gefordert hätte, schien also nicht vorhanden. Dazu kam, dass gerade in dieser Zeit das bis dahin sicherste Fundament der Theorie der Materie, die Atomistik, in ihrer Geltung dadurch erschüttert wurde, dass ihre sicherste Stütze, die Chemie, an ihr irre zu werden schien. Die Atomentheorie, welche bis dahin die theoretische Chemie so mächtig gefördert hatte, zeigte sich doch nach und nach zur Erklärung der immer complicirter sich gestaltenden chemischen Erscheinungen ohnmächtig. Die vielfachen Isomerien, Metamerien und Polymerien, sowie die immer zahlreicher auftretenden allotropischen Modificationen schienen mit der angenommenen Unveränderlichkeit der Atome unvereinbar, eine grosse chemische Schule hatte die Atome als unnütze Fictionen bereits gänzlich aufgegeben und sogar der Name Atomgewicht war von ihr durch die Bezeichnung Aequivalent ersetzt worden [1]). Danach darf es nicht Wunder nehmen, wenn ein grosser Theil der Physiker, die den Sturz des alten Gebäudes noch nicht recht überwunden, an der Möglichkeit eines systematischen Aufbaues der Wissenschaft auf tieferen, direct nicht anschaulichen Fundamenten überhaupt verzweifelte, wenn ihm alle Neuerungen nur anzudeuten schienen, dass man über die directe Beobachtung nicht hinausgehen dürfe und dass jedes Naturgesetz nur durch empirische Näherungsformeln sichergestellt werden könnte. Diesen Physikern galt nur die Beschreibung der direct beobachteten Vorgänge für wissenschaftlich möglich und nur eine durch Induction aus vielen Beobachtungen erschlossenen Regel für wahr-

---

[1]) A. Ladenburg sagt in seinen „Vorträge über die Entwicklungsgeschichte der Chemie in den letzten hundert Jahren“ (Braunschweig 1887, S. 188) von der Chemie zu Anfang der vierziger Jahre: „Die Gmelin'sche Schule hatte an Anhang bedeutend gewonnen, und ihr erschien die atomistische Theorie zu hypothetisch. . . . Seit dem Sturze des Berzelius'schen Systems, des einzigen, welches in einheitlichem Sinne die ganze Wissenschaft umfasste . . ., entstand bei Vielen eine gewisse Abneigung gegen jede Speculation, welche man als verfrüht und der Wissenschaft nachtheilig betrachtete. Nur die nüchterne Auffassung der Beobachtungen war zeitgemäss. . . . Da für diese Schule die Formeln nur die Zusammensetzung der Körper in abgekürzter Schreibart darstellten, so hatte sie das Recht, ihre Aequivalente oder Mischungsgewichte unter den möglichen Multiplen beliebig zu wählen. Einfachheit in der Symbolisirung schien ihr das Maassgebende.“

scheinlich sicher; Hypothesen über die Ursachen der Erscheinungen waren ihnen unter allen Umständen nur Constructionshülfen zur besseren Uebersicht der Resultate und zur leichteren Induction der Gesetze, waren aber in allen Fällen ohne jede objective Gültigkeit. Die physikalischen Hypothesen erschienen danach auf der einen Seite gänzlich willkürlich, ohne jede Nothwendigkeit eines Zusammenhanges, ja ohne dass ein innerer Widerspruch zwischen solchen unthunlich oder unwissenschaftlich gewesen wäre; auf der anderen Seite aber galt doch die Beschäftigung mit solchen Unrealitäten für gefährlich, und zwar für um so gefährlicher, je mehr dieselben inneren Zusammenhang und allgemeinere Anwendbarkeit zeigten. Gerade weil gewisse hypothetische Theorien durch eine weitere Benutzung einen verführerischen Schein von Realität erhalten, deswegen glauben einige Physiker unduldsam gegen alle Hypothesen sein zu müssen, und diese bemühten sich dann, den Newton'schen Ausspruch „Hypothesen bilde ich nicht“ in die ketzerrichterische Regel zu übersetzen: Hypothesen dürft Ihr nicht bilden.

Trotz dieses drohenden Dictums aber, und trotzdem manches Auto da Fé zu Ehren desselben vollzogen wurde, liessen sich doch die Physiker, welche ein tieferes causales Bedürfniss und ein stärkeres Vertrauen in die Begreiflichkeit der Welt hatten, nicht davon abhalten, dem inneren Wesen der Erscheinungen nachzugehen, dem ursächlichen Zusammenhang der Erscheinungen nachzuforschen und die Realität aller angenommenen Materien und Kräfte wenigstens als Ideal der menschlichen Erkenntniss zu fordern. Dieser Forderung gegenüber mussten nothwendig die vorhandenen Widersprüche aufgelöst werden; von diesem Standpunkte aus war man gezwungen, zwischen den verschiedenen elementaren Imponderabilien und dem einen Aether, oder noch tiefer zwischen den verschiedenen primitiven Kräften, die man ihrer gesonderten Wirkungen wegen an verschiedene Materien binden musste, und den beharrlichen Bewegungen als Ursachen der Erscheinungen, die alle auf die Theile einer Art der Materie übertragen werden konnten, zu entscheiden. Den Imponderabilien, die eigentlich nie etwas anderes gewesen, als begrifflich leere Fundamente für bestimmte Kraftwirkungen, war ebendeswegen direct nicht beizukommen, und so musste man nothwendigerweise, um Klarheit zu erlangen, auf das Problem der Kräfte zurückgehen.

Dies geschah in ganz bestimmter, principiell gleicher Weise von den beiden Vorkämpfern der neuesten Physik, von R. Mayer sowohl als von Joule, nur dass der erstere direct von dem allgemeinen Probleme ausging und ein specielles nur als Beispiel anführte, während der andere mit diesem speciellen Probleme begann und danach erst zu dem allgemeinen aufstieg. Beide gingen von der vollkommenen Umwandlungsfähigkeit aller Kräfte ineinander als von einer vollständig constatirten Thatsache aus, und beide behaupteten die Constanz des Umwandlungsverhältnisses in allen Fällen. Mayer aber begründete diese Constanz für alle Kräfte ganz allgemein und gab die Constanz des Transformationsverhältnisses von Wärme und mechanischer Arbeit nur als ein Beispiel, während Joule umgekehrt das mechanische Aequivalent der Wärme zuerst durch zahlreiche und feine Versuche bestimmte und eine ähnliche Bestimmtheit des Umwandlungsverhältnisses dann für alle Kräfte als mindestens wahrscheinlich aussprach.

Joule's Arbeiten brachten das Gesetz von der Erhaltung der Kraft zu schneller Anerkennung. Damit war aber die Beseitigung der imponderablen Materie als reeller Stoffe unbedingt geboten; denn eine Umwandlung, bei welcher die eine Kraft bis ins Endlose immer erzeugt wurde, während die andere in einem ganz bestimmten Verhältniss dazu immer verschwand, war wohl denkbar, wenn die Kräfte nur als Wirkungen verschiedener Bewegungen, aber nicht, wenn sie als besondere Eigenschaften unvergänglicher und unwandelbarer Materien gedacht wurden.

Vor der Hand freilich zog man diesen Schluss nur für den Wärmestoff, der direct durch das Gesetz von der Erhaltung der Kraft seinen Untergang fand. Joule vor Allen führte gleich in seinen ersten Abhandlungen aus, dass die Wärme der ponderablen Körper ebenso wie die freie, strahlende Wärme auf Bewegungen, und zwar auf Bewegungen der materiellen Molecüle zurückzuführen sei, auch Mayer sprach der Wärme jede Materialität ganz bestimmt ab und die Physiker schlossen sich mit wenigen Ausnahmen diesen Ansichten ohne Weiteres an. Clausius, Thomson und Rankine unternahmen dann die schwierige Aufgabe, die mechanischen Wirkungen der Wärme, welche Carnot mit so vielem Erfolge aus einem Gefälle des Wärmestoffes erklärt hatte, aus den Wärmebewegungen abzuleiten und so auch die Theorie der thermo-

dynamischen Maschinen auf die neuen Anschauungen zu gründen. Aus diesen Untersuchungen entwickelte sich dann zu dem Gesetz von der Erhaltung der Kraft als erstem noch ein zweiter Hauptsatz der neuen Wärmetheorie, in welchem ausgesprochen wurde, dass nicht alle in einem Körper enthaltene Wärme ohne Weiteres in mechanische Arbeit umgewandelt werden könnte. Ueber diesen letzteren Satz aber entstand ein grosser Streit, der sich vorzüglich um den Geltungsbereich und um die Begrenzung desselben drehte und der auch heute noch nicht abgeschlossen ist. Doch trug gerade dieser Streit sehr viel zur weiteren Entwicklung der Anschauungen nach der neueren Richtung bei. Indem man sich bemühte, bei allen den Discussionen die Wärme nur als eine Art der Bewegung zu behandeln, trat man immer mehr aus dem Gebiete einer specifischen Wärmetheorie heraus und gelangte zu allgemeineren mechanischen Vorstellungen. Der zweite Hauptsatz der Wärmetheorie erweiterte sich damit zu einem allgemeinen, mechanischen Principe, wie überhaupt alle physikalischen Gebiete, aus den Fesseln der Imponderabilien sich befreiend, mehr und mehr nur als einzelne Theile einer allgemeinen mechanischen oder besser kinetischen Physik sich zu entwickeln begannen. Ein solcher Umwandlungsprocess z. B. spielte sich auch ab bei dem schwierigen Begriffe der Temperatur, dessen Definition, zuerst auf die Empfindung der Wärme, dann auf den Austausch der Wärme begründet, nun ebenfalls auf die Bewegung zurückgeführt und also mechanisch behandelt wurde.

Ein hohes Zeichen der neuen Zeit bleibt noch aus dem Gebiete der Elektricität zu erwähnen. Wie schon bemerkt, war gerade hier die Entfernung der imponderablen Flüssigkeiten am wenigsten gelungen, und die Versuche einer mechanischen Theorie der Elektricität waren durchaus verunglückt. Trotzdem trat W. Weber, der auch an den elektrischen Flüssigkeiten unentwegt festhielt, mit einer Arbeit auf, in der er aussprach, dass die Newton'sche Kraftformel zur Charakterisirung der elektrischen Wirkungen durchaus unzulänglich sei, dass die Attractiv- und Repulsivkräfte der elektrischen Flüssigkeiten nicht, wie es die Newton'schen Vorstellungen fordern, von der Bewegung unabhängig, sondern dass sie vielmehr von der Geschwindigkeit und sogar von der Beschleuni-

gung abhängig sind. Damit löste Weber in nicht zu verkennender Weise auch die elektrischen Kräfte von den alten Vorstellungen, wonach dieselben als elementare Eigenschaften der Materie auftreten, und führte wenigstens einen Theil der Wirkung auf die Bewegung zurück, ein Anfang, der später, wie wir sehen werden, zu weiteren Neubildungen nothwendig hinleitete. Eben demselben Ziele aber diente auch Weber's Einführung des absoluten Maasssystems in die Theorie der Elektricität; denn wenn alle Wirkungen derselben durch die absoluten Einheiten von Masse, Raum und Zeit vollständig bestimmt werden konnten, so mussten dieselben auch von specifisch elektrischen Flüssigkeiten vollkommen unabhängig sein.

Doch müssen wir für alle die erwähnten Ansätze zu einer mechanischen Physik betonen, dass in der vorliegenden Periode überall kaum mehr als die Keime der Neuerung gelegt und die weiteren Folgerungen und Schlüsse mit Bewusstsein an den meisten Stellen erst in der nächsten Periode gezogen wurden. Ein weiteres Zeichen dafür ist die Thatsache, dass man die Aufstellung des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft noch vielfach nur als die Verallgemeinerung einer längst im Speciellen gebrauchten Regel betrachtete und die eigentlich fermentive Bedeutung desselben erst in der nächsten Zeit würdigen lernte.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Mit der Aufstellung des Gesetzes der Beharrung war die Unzerstörbarkeit der Bewegung in sich anerkannt. Für diejenigen Physiker, welche keine anderen Kräfte in der Materie als lebendige Kräfte des Stosses, keine andere Ursache von Bewegungen als wieder Bewegungen anerkannten, war danach auch die Erhaltung der Kraft ein fundamentales, aus dem Beharrungsgesetz direct sich ergebendes Princip aller Naturwissenschaft. Deshalb sprach Descartes dieses Princip mit vollkommener Sicherheit als selbstverständlich aus [1]), und lange schon vor ihm zeigten sich Spuren des Gesetzes bei den antiken atomistischen Physikern [2]). Anders lag die Sache für die Physiker, welche als Ursachen der Bewegungen auch Urkräfte der Materien zugaben und annahmen, dass ein ruhender Körper aus sich selbst heraus andere Körper bewegen könne. Sollte für diese, seit Newton ausschliesslich herrschende sogenannte dynamische Auffassung der Materie ein Gesetz

---

[1]) Principia philosophiae, II, §. 36.

[2]) Siehe G. Berthold, Notizen zur Geschichte des Princips von der Erhaltung der Kraft, Pogg. Ann. CLVII, S. 342.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

über die Summe aller im Universum wirkenden Kräfte überhaupt möglich sein, so musste erst gezeigt werden, dass dieses Gesetz nicht direct Bezug habe auf die elementaren Kräfte der Materien, sofern diese überhaupt unter gewissen Umständen Bewegung hervorbringen können, sondern nur auf die begrenzten Wirkungs- oder Arbeitsfähigkeiten, die ihnen nach ihren gegebenen Wechselbeziehungen zu anderen Körpern, nach ihrer Lage im Universum möglich sind. So lange man nur die verschiedenen Arten der Wirkungsfähigkeiten verschiedener ponderabler und imponderabler Materien im Allgemeinen betrachtete, so lange blieb ein Gesetz von der Erhaltung der Kraft ein Unding. Erst wenn man sich gewöhnte, die Abhängigkeit der Wirkungsgrössen jener elementaren Kräfte von den gegebenen räumlichen Verhältnissen mit in Betracht zu ziehen, dann erst konnte man die Constanz der so begrenzten Arbeitsfähigkeit des Universums begreifen. Darum findet man wohl nach der mathematischen Definirung des Begriffs der Arbeit in einzelnen Abhandlungen, die sich mit der Messung bestimmter Kraftwirkungen beschäftigen, Andeutungen des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft; eine allgemeine Anerkennung desselben als eines physikalischen Grundprincips aber konnte erst erfolgen, nachdem die Abhängigkeit aller physikalischen Kraftwirkungen von bestimmten räumlichen Verhältnissen nachgewiesen und der neue Begriff der Kraft als einer bestimmten Arbeitsfähigkeit genau formulirt und postulirt war. Diese That leistete unbestreitbar zuerst **Julius Robert Mayer.** Weil aber diese That weniger auf einer aufweisbaren, neu entdeckten Thatsache beruhte, sondern vielmehr ihren Hauptwerth in der Forderung einer neuen Anschauung von der Kraft hatte, so musste nach alter Welteinrichtung diese That zuerst unverstanden und unanerkannt bleiben, und das Verdienst Mayer's muss noch heute von einseitigen Physikern, die einzig die experimentelle Methode als wissenschaftlich berechtigt anerkennen wollen, bestritten werden.

Robert Mayer veröffentlichte seine erste Abhandlung im Mai 1842 [1]) in den Annalen der Chemie und Pharmacie unter dem wenig günstig gewählten Titel „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur". „Der Zweck der folgenden Zeilen ist", so beginnt Mayer seine Arbeit, „die Beantwortung der Frage zu versuchen, was wir unter „„Kräften"" zu verstehen haben, und wie sich solche unter einander verhalten. . . . Kräfte sind Ursachen, mithin findet auf dieselben volle Anwendung der Grundsatz: causa aequat effectum. . . . In einer Kette von Ursachen und Wirkungen kann, wie aus der Natur einer Gleichung

---

[1]) Ann. d. Chem. u. Pharm. von Wöhler und Liebig, XLII, S. 233, 1842; abgedruckt in: „Die Mechanik der Wärme" von J. R. Mayer. S. 3 bis 12, Stuttgart 1874. Poggendorff hatte der Abhandlung die Aufnahme in seine Annalen der Physik und Chemie verweigert und hat auch in denselben keine der späteren Abhandlungen Mayer's abgedruckt.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

erhellt, nie ein Glied oder ein Theil eines Gliedes zu Null werden. Diese erste Eigenschaft aller Ursachen nennen wir ihre Unzerstörlichkeit.... Die Fähigkeit, verschiedene Formen annehmen zu können, ist die zweite wesentliche Eigenschaft aller Ursachen. Beide Eigenschaften zusammengefasst sagen wir: Ursachen sind (quantitativ) unzerstörliche und (qualitativ) wandelbare Objecte. . . . Eine Ursache, welche die Hebung einer Last bewirkt, ist eine Kraft; ihre Wirkung, die gehobene Last, ist also ebenfalls eine Kraft; allgemeiner ausgedrückt heisst dies: räumliche Differenz ponderabler Objecte ist eine Kraft; da diese Kraft den Fall der Körper bewirkt, so nennen wir sie Fallkraft." Nachdem so Mayer an einem Beispiel den richtigen Begriff der Kraft und seine Merkmale dargestellt, versucht er die alte, gangbare Vorstellung von Kraft zu beseitigen. „Indem man die Schwere als Ursache des Falls betrachtet, spricht man von einer Schwerkraft und verwirrt so die Begriffe von Kraft und Eigenschaft; gerade das, was jeder Kraft wesentlich zukommen muss, die Vereinigung von Unzerstörbarkeit und Wandelbarkeit, geht jedweder Eigenschaft ab. . . . Heisst man die Schwere eine Kraft, so denkt man sich damit eine Ursache, welche, ohne selbst abzunehmen, Wirkung hervorbringt, hegt also unrichtige Vorstellungen über den ursächlichen Zusammenhang der Dinge. Um dass ein Körper fallen könne, dazu ist seine Erhebung nicht minder nothwendig, als seine Schwere, man darf daher letzterer allein den Fall der Körper nicht zuschreiben." Der Zusammenhang zwischen der Fallkraft und der Kraft der Bewegung und die Umwandlungsverhältnisse beider sind lange bekannt und bestimmt; häufig aber sehen wir Bewegung aufhören, ohne dass diese Bewegung eine andere Bewegung oder auch eine Gewichtserhebung hervorgebracht hätte. Um in solchen Fällen zu finden, was aus der verschwundenen Bewegung geworden ist, muss man Werkzeuge wählen, welche neben dem, dass sie eine Bewegung wirklich zum Aufhören bringen, von den zu untersuchenden Objecten möglichst wenig verändert werden. Reiben wir z. B. zwei Metallplatten aneinander, so werden wir Bewegung verschwinden, Wärme dagegen auftreten sehen, und es fragt sich jetzt nur, ist die Bewegung die Ursache von Wärme? Nun werden aber beim Reiben die Metallplatten nicht anders verändert, als wo dabei Metallstaub abgerieben wird; dieser kann nicht die Wirkung der aufhörenden Bewegung sein, denn aus dem Staub kann man gewiss nicht die Bewegung wieder hervorbringen. „Zu Nichts, wir wiederholen, kann die Bewegung auch nicht geworden sein, und entgegengesetzte oder positive und negative Bewegungen können nicht gleich Null gesetzt werden, so wenig aus Null entgegengesetzte Bewegungen entstehen können, oder eine Last sich von selbst heben kann. . . . Ist es nun ausgemacht, dass für die verschwindende Bewegung in vielen Fällen (exceptio confirmat regulam) keine andere Wirkung gefunden werden kann, als die Wärme, für die entstandene Wärme keine andere Ursache, als die Bewegung, so ziehen wir die Annahme, Wärme entsteht

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

aus Bewegung, der Annahme einer Ursache ohne Wirkung und einer Wirkung ohne Ursache vor . . . Den natürlichen, zwischen Fallkraft, Bewegung und Wärme bestehenden Zusammenhang können wir uns auf folgende Weise anschaulich machen. Wir wissen, dass Wärme zum Vorschein kommt, wenn die einzelnen Massentheile eines Körpers sich näher rücken; Verdichtung erzeugt Wärme; was nun für die kleinsten Massentheile und ihre kleinsten Zwischenräume gilt, muss wohl auch seine Anwendung auf grosse Massen und messbare Räume finden. Das Herabsinken einer Last ist eine wirkliche Volumsverminderung des Erdkörpers, muss also gewiss mit der dabei sich zeigenden Wärme im Zusammenhange stehen; diese Wärme wird der Grösse der Last und ihrem (ursprünglichen) Abstande genau proportional sein müssen. . . . Wenn Fallkraft und Bewegung gleich Wärme, so muss natürlich auch Wärme gleich Bewegung und Fallkraft sein. Wie die Wärme als Wirkung entsteht, bei Volumsverminderung und aufhörender Bewegung, so verschwindet die Wärme als Ursache unter dem Auftreten ihrer Wirkungen, der Bewegung, Volumsvermehrung, Lasterhebung. In den Wasserwerken liefert die, auf Kosten der Volumsverminderung, welche der Erdkörper durch den Fall des Wassers beständig erleidet, entstehende und wieder verschwindende Bewegung fortwährend eine bedeutende Menge von Wärme; umgekehrt dienen wieder die Dampfmaschinen zur Zerlegung der Wärme in Bewegung oder Lasterhebung. Die Locomotive mit ihrem Convoi ist einem Destillirapparate zu vergleichen; die unter dem Kessel angebrachte Wärme geht in Bewegung über, und diese setzt sich wieder an den Axen der Räder als Wärme in Menge ab."

Mayer geht in dieser Abhandlung nicht auf das gegenseitige Verhältniss anderer physikalischer Kräfte, als Fallkraft, Wärme und Bewegung, ein; er endet dieselbe, ohne jeden weiteren Hinweis auf die Wichtigkeit oder Neuheit des Folgenden, mit der quantitativen Bestimmung des Umwandlungsverhältnisses von Fallkraft und Wärme oder, wie wir heutzutage sagen, des mechanischen Aequivalents der Wärme [1]). „Wir schliessen unsere Thesen, welche sich mit Nothwendigkeit aus dem Grundsatze „causa aequat effectum" ergeben und mit allen Naturerscheinungen im vollkommenen Einklang stehen, mit einer praktischen Folgerung. — Zur Auflösung der zwischen Fallkraft und Bewegung statthabenden Gleichungen musste der Fallraum für eine bestimmte Zeit, z. B. für die erste Secunde, durch das Experiment bestimmt werden; gleichermaassen ist zur Auflösung der zwischen Fallkraft und Bewegung einer- und der Wärme anderseits bestehenden Gleichungen die Frage zu beantworten, wie gross das einer bestimmten Menge von Fallkraft oder Bewegung entsprechende Wärmequantum sei. Z. B. wir müssen ausfindig machen, wie hoch ein bestimmtes Gewicht über den Erdboden erhoben werden

[1]) Die folgenden Sätze bilden, unverändert und unverkürzt, den Schluss der Mayer'schen Arbeit.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

müsse, dass seine Fallkraft äquivalent sei der Erwärmung eines gleichen Gewichtes Wasser von 0° auf 1° C.? Dass eine solche Gleichung wirklich in der Natur begründet sei, kann als das Resumé des Bisherigen betrachtet werden. Unter Anwendung der aufgestellten Sätze auf die Wärme- und Volumsverhältnisse der Gasarten findet man die Senkung einer ein Gas comprimirenden Quecksilbersäule gleich der durch die Compression entbundenen Wärmemenge, und es ergiebt sich hieraus, — den Verhältnissexponenten der Capacitäten der atmosphärischen Luft unter gleichem Drucke und unter gleichem Volumen = 1,421 gesetzt — dass dem Herabsinken eines Gewichtstheiles von einer Höhe von circa 365 m die Erwärmung eines gleichen Gewichtstheiles Wasser von 0° auf 1° entspreche. Vergleicht man mit diesem Resultate die Leistungen unserer besten Dampfmaschinen, so sieht man, wie nur ein geringer Theil der unter dem Kessel angebrachten Wärme in Bewegung oder Lasterhebung wirklich zersetzt wird, und dies könnte zur Rechtfertigung dienen für die Versuche, Bewegung auf anderem Wege als durch Aufopferung der chemischen Differenz von C und O, namentlich also durch Verwandlung der auf chemischem Wege gewonnenen Elektricität in Bewegung, auf erspriessliche Weise darstellen zu wollen."

Die Abhandlung Mayer's war ein Schlag ins Wasser oder noch richtiger ein Lufthieb ohne jeden Erfolg in der wissenschaftlichen Welt. Entschuldigt, wenn auch nicht erklärt, wird dies durch die Schrift selbst. Der Titel war zu nichtssagend, um Aufmerksamkeit zu erregen. Die Neubildung des Begriffs der Kraft trat kaum in der Absicht und jedenfalls nicht in ihrer Nothwendigkeit hervor. Die Grösse des mechanischen Aequivalents der Wärme war nicht klar und verständlich abgeleitet, sondern mehr nebenbei und nur als praktisches Beispiel gegeben.

Alle diese Mängel fielen weg mit der drei Jahre später erschienenen Abhandlung Mayer's, die eine vollständige, systematische Ausbildung der neuen Anschauungen enthielt. Leider entsprach der Titel „Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel" (Heilbronn 1845)[1]) abermals nicht der ganzen Bedeutung des Inhalts. Mayer behandelt nämlich in dieser Schrift durchaus nicht bloss die organische Bewegung, sondern holt vielmehr in dieser Schrift nach, was er in der ersten unterlassen, die ganz klare systematische Entwicklung des neuen Begriffs der Kraft, die Anwendung dieses Begriffs auf alle physikalischen Potenzen und endlich die lückenlose Ableitung des mechanischen Aequivalents der Wärme. Diese Schrift erscheint danach als das eigentlich fundamentale Hauptwerk Mayer's und die erste Abhandlung nur als eine vorläufige Kundgebung, nur bestimmt, die Priorität der Entdeckung zu sichern.

[1]) Abgedruckt in: „Die Mechanik der Wärme" von J. R. Mayer, Stuttgart 1884, S. 13 bis 126.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Mayer beginnt also abermals mit der Discussion des Begriffs Kraft. „Die Begriffe, welche sich die Mechanik zu ihren Zwecken geschaffen hat, werden von anderen Wissenschaften weiter fortgeführt, als es im Sinne der ersteren liegen konnte. Auf die Frage, was unter einem „„Körper““ zu verstehen sei? wird der Geometer antworten: „„ohne Präjudiz für den Physiker, Zoologen, Psychologen u. s. w. ist nach unseren Begriffen ein Körper ein nach drei Dimensionen begrenzter Raum.““ Der Mechaniker, welcher sich die Entstehung, Abänderung, Aufhebung jeder Bewegung durch einen Druck bewerkstelligt vorstellt, nennt diesen in abstracto „„Kraft““; die Fähigkeit der Masse, einen solchen Druck ausüben zu können, die Schwere, nennt er eine Kraft. Ohne aber bei der Abstraction des Mechanikers: Kraft = Druck zu bleiben, wurde in anderen Wissenschaften die Schwere als Typus der Kräfte aufgestellt und damit eine künstliche Verwirrung der Begriffe: Eigenschaft, Kraft, Ursache, Wirkung, herbeigeführt, die bei dem Baue des Thurmes der Erkenntniss zu einem mächtigen Hindernisse geworden [1]). Bevor wir nun mit der Untersuchung physiologischer Gesetze beginnen, möge es erlaubt sein, über den Begriff von Kraft mit dem Leser uns zu verständigen."

Die neue Definition des Begriffs der Kraft entwickelt Mayer danach ganz wie in der ersten Abhandlung, nur dass er hier bestimmter und klarer in seinen Sätzen wird. „Was die Chemie", sagt er, „in Beziehung auf Materie, das hat die Physik in Beziehung auf Kraft zu leisten. Die Kraft in ihren verschiedenen Formen kennen zu lernen, die Bedingungen ihrer Metamorphosen zu erforschen, dies ist die einzige Aufgabe der Physik, denn die Erschaffung oder die Vernichtung einer Kraft liegt ausser dem Bereiche menschlichen Denkens und Wirkens. . . . Es giebt in Wahrheit nur eine einzige Kraft. In ewigem Wechsel kreist dieselbe in der todten wie in der lebenden Natur. Dort und hier kein Vorgang ohne Formveränderung der Kraft!"

Bewegung und Fallkraft sind einzelne Kraftformen, ihre Unzerstörbarkeit in ihren gegenseitigen Transformationen ist schon lange

---

[1]) Dass Mayer bei seiner Neubildung des Kraftbegriffs sich der Construction der Materie gegenüber, wie Kant sie in seinen metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft versucht, als Widersacher fühlte, ist nicht zu verwundern, wenn auch vielleicht nicht in aller Strenge zu rechtfertigen. Bezeichnend hierfür ist eine Stelle aus einem Vortrag, den Mayer im Jahre 1870 hielt: „Die Materie existirt, und in ihrer Existenz liegt auch das Recht der Existenz. Wenn der Königsberger Philosoph die Welt in eine Centripetal- und in eine Centrifugalkraft auflösen wollte, so hat er sich hier einer ungeschickten und verwirrenden Terminologie bedient, die schon im Principe verfehlt und nicht lebensfähig ist. . . . Die Naturwissenschaften haben sich zum Glück von philosophischen Systemen emancipirt und gehen an der Hand der Erfahrung mit gutem Glück ihren eigenen Weg." (Mechanik der Wärme, S. 333.)

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

in der Mechanik durch das Princip der Erhaltung der lebendigen Kraft anerkannt. Auch „die Wärme ist eine Kraft; (denn) sie lässt sich in mechanischen Effect verwandeln. . . . Gleiche Mengen von Brennmaterial geben unter gleichen Umständen gleiche Wärmemengen; die Kohlen aber, welche unter dem Kessel verbrennen, geben weniger Wärme frei, wenn die Maschine arbeitet, als wenn sie stille steht. . . . Gay Lussac hat durch das Experiment bewiesen, dass eine elastische Flüssigkeit, die aus einem Ballon in einen gleich grossen luftleeren Behälter einströmt, im ersten Gefäss genau um so viele Grade sich abkühlt, als sie sich im zweiten erwärmt. . . . Ebenso constatirt ist aber auch die Thatsache, dass ein Gas, welches unter einem Drucke sich ausdehnt, eine Temperaturverminderung erleidet.... Die Wärmemenge, welche zur Hervorbringung eines bestimmten mechanischen Effectes aufzuwenden ist, muss auf experimentalem Wege ermittelt werden. . . . Ein Cubikcentimeter atmosphärischer Luft bei $0^0$ und 0,76 m Barometer, so führt Mayer nun diese Ermittelung aus, wiegt 0,0013 g; bei constantem Drucke um $1^0$C. erwärmt, dehnt sich die Luft um $^1/_{274}$ ihres Volumens aus und hebt somit eine Quecksilbersäule von einem Quadratcentimeter Grundfläche und 76 cm Höhe um $^1/_{274}$ cm. Das Gewicht dieser Säule beträgt 1033 g. Die specifische Wärme der atmosphärischen Luft ist bei constantem Drucke, die des Wassers = 1 gesetzt, nach Delaroche und Bérard = 0,267; die Wärmemenge, die unser Cubikcentimeter Luft aufnimmt, um bei constantem Drucke von 0 auf $1^0$ zu kommen, ist also der Wärme gleich, durch welche $0{,}0013 \times 0{,}267$ oder 0,000347 g Wasser um $1^0$ erhöht werden. Nach Dulong, dem hierin die Mehrzahl der Physiker folgt, verhält sich die Wärmemenge, welche die Luft bei constantem Volumen aufnimmt, zu der bei constantem Drucke, wie 1 : 1,421; hiernach gerechnet ist die Wärmemenge, die unseren Cubikcentimeter Luft bei constantem Volumen um $1^0$ erhöht, $= \frac{0{,}000347}{1{,}421}$ $= 0{,}000244^0$. Es ist folglich die Differenz $0{,}000347 - 0{,}000244$ $= 0{,}000103^0$ Wärme, durch deren Aufwand das Gewicht $P = 1033$ g, auf $h = {}^1/_{274}$ cm gehoben wurde. Durch Reduction dieser Zahlen findet man nun

$$1^0 \text{ Wärme} = 1 \text{ g auf} \begin{cases} 367 \text{ m} \\ 1130 \text{ par. Fuss} \end{cases} \text{Höhe}^{1)}.$$

Das nämliche Resultat wird erhalten, wenn man statt der atmosphärischen Luft eine andere einfache oder zusammengesetzte Gasart der

[1]) Mayer macht bei dem späteren Wiederabdruck der Abhandlung darauf aufmerksam, dass nach den durch Regnault gewonnenen genaueren Bestimmungen der hier in Rechnung kommenden Wärme- und Druckverhältnisse der Gase $1^0$ Wärme = 1 g auf $\begin{cases} 425 \text{ m} \\ 1308' \end{cases}$ Höhe zu setzen ist und dass er von da an bei seinen weiteren Rechnungen die letzteren Zahlen benutzen wird.

Erhaltung der Kraft Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Berechnung unterlegt. Das Gesetz „„Wärme = mechanischer Effect““ ist unabhängig von der Natur einer elastischen Flüssigkeit, die nur als Werkzeug dient, um die Umwandlung der einen Kraft in die andere zu bewerkstelligen“.

Nach dieser durchaus exacten, auf die besten damals existirenden Messungen gegründeten Bestimmung des mechanischen Aequivalents der Wärme geht Mayer zur weiteren Verwerthung dieser Zahl über. Nach Liebig's Angaben beträgt die Wärmemenge, welche 1 g Kohlenstoff beim Verbrennen entwickelt, 8558$^0$, dieselbe würde genügen, um 3 600 000 g auf die Höhe von 1 m zu heben, d. h. „dieser Effect würde erzielt werden, wenn jeder Wärmeverlust vermieden werden könnte. So wenig aber eine gegebene Menge von Chlor, Metall und Sauerstoff, ohne Bildung eines Nebenproductes, in chlorsaures Salz sich verwandeln lässt, so wenig können wir eine gegebene Wärmemenge als Ganzes in Bewegung umsetzen [1]“. Der constante Zusammenhang zwischen Wärme und Fallkraft wird hier in ganz derselben merkwürdigen Weise wie in der ersten Schrift nachgewiesen. „Angenommen, die ganze Erdrinde könnte auf ringsum gestellten Säulen in die Höhe gehoben werden, so müsste zur Hebung der unermesslichen Last ein ungeheures Quantum Wärme verwendet werden. Wenn es nun einleuchtet, dass die Volumens-Vermehrung des Erdkörpers, gleich der jeder anderen Masse, mit dem „latent werden“ einer entsprechenden Wärmemenge verbunden ist, so ist auch klar, dass bei der Volumens-Verminderung eine gleiche Wärmemenge wieder frei werden muss. Was aber von der Erdrinde im Ganzen gilt, das muss offenbar auch auf jeden Bruchtheil eine Anwendung finden. Bei der Hebung des kleinsten Gewichtes muss Wärme (oder eine andere Kraft) latent werden; bei der Senkung des Gewichtes muss diese Wärme wieder zu Tage kommen. Es wurde soeben gesehen, dass zur Hebung eines Kilogramm Gewichtes auf 425 m eine Wärmeeinheit erforderlich ist, woraus folgt, dass ein Kilogramm Gewicht, welches 425 m hoch herabsinkt, durch Stoss oder Reibung wieder eine Wärmeeinheit (Calorie) entbinden muss. Durch herkömmliche Voraussetzungen über das Wesen einer bewegenden Kraft und einer Bewegung waren die Physiker verhindert, diese offenbare und in der Erfahrung fest begründete Thatsache einzusehen. Newton (Princ. I, Def. VIII) erklärt ausdrücklich die Schwere für eine causa mathematica und warnt, sie für eine causa physica zu nehmen [2]). Diese wichtige Unterscheidung wurde

[1]) Mechanik der Wärme, Stuttgart 1874, S. 31 bis 32. Ein interessanter, bei Mayer isolirter Satz, der an die begrenzende Bestimmung des ersten Hauptsatzes der Wärmetheorie durch den zweiten schon deutlich erinnert.

[2]) In einer Anmerkung bestimmt Mayer seine Fallkraft ausdrücklich als $mc^2$, während er die Schwere durch $\frac{dc}{dt}$ charakterisirt. (Wie damals üblich, nahm Mayer noch das ganze Product $mc^2$ als Maass der Arbeit.)

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850

aber von den Nachfolgern Newton's vernachlässigt; die Schwere oder die Ursache der Beschleunigung wurde für die Ursache der Bewegung genommen und damit eine Entstehung von Bewegung ohne Aufwand von Kraft statuirt, sofern beim Fallen eines Gewichtes von der Schwere nichts aufgewendet wird. In nothwendiger Consequenz mit ihrer Entstehungsweise liess man eine gegebene Bewegung nach Umständen wieder in ihr Nichts zurücksinken. . . . Schöpfen wir aus einem Bassin, aus einem See oder aus dem Weltmeere ein Glas Wasser, so werden wir die hierdurch bedingte Abnahme der grossen Wassermenge nicht wahrnehmen können. Wenn man aber zugeben wollte, dass die Gewässer durch Entziehung einiger Unzen Flüssigkeit keine Substanzverminderung erfahren würden, so müsste nothwendig gefolgert werden, dass diese Unzen aus dem Nichts erschaffen werden —, und dem Meere zurückgegeben, wiederum zu Nichts verschwinden könnten. Der gleiche Schluss gilt für die Kräfte. Wir wollen also fragen, ist die bewegende Kraft, die einem 15′ hoch auf den Erdboden herabfallenden Gewichte die Geschwindigkeit von 30′ ertheilt, eine constante? Hierauf pflegt man zu antworten: Die Ab- und Zunahme der Gravitation darf bei so geringen Höhen füglich ausser Acht gelassen werden, also „„Ja““. Wir sagen „„Nein““. Wenn die Kraft constant wäre, so müsste sie in einer entsprechenden Zeit eine beliebig grosse Bewegung hervorbringen können; dazu fehlt aber viel. Die Geschwindigkeit, welche ein gegen die Erde fallendes Gewicht erlangen kann, hat ein Maximum; es beträgt dasselbe 34 450′ (11 200 m) in einer Secunde; mit dieser Geschwindigkeit $G$ wird eine aus unendlicher Entfernung herabfallende Masse $m$ auf der Oberfläche der Erde $T$ anlangen. Die aus dem totalen räumlichen Abstande der Massen $T$ und $m$ resultirende bewegende Kraft, oder die totale Fallkraft von $m$ ist also $= m\,G^2$. Die aus einem partialen Abstande der Massen resultirende partiale Kraft ist ein leicht zu berechnender Bruchtheil der totalen Kraft. Für terrestrische Höhen ist der Zähler dieses Bruches der Fallraum, der Nenner der Erdhalbmesser. Durch das Herabfallen der Masse $m$ von 15′ Höhe wird also eine Bewegungsgrösse erhalten $= m\,G^2 \cdot \frac{15}{19\,609\,050}$, oder es ist die Geschwindigkeit, mit der $m$ auf dem Boden anlangt, $= G \cdot \sqrt{\frac{15}{19\,609\,050}}$. Wenn das Gewicht aus unendlicher Höhe bis auf eine Entfernung von 15′ gegen die Erde herabgefallen ist, so sind $\frac{1\,299\,999}{1\,300\,000}$ der totalen Fallkraft verwendet worden; $\frac{1}{1\,300\,000}$ dieser Kraft ist noch übrig, und unter dem Aufwande dieser verhältnissmässig allerdings sehr kleinen Kraft wird die verhältnissmässig ebenso kleine Wirkung, die Bewegung von $m$ mit 30′ Geschwindigkeit, erzielt. Es ist also klar, dass die Fallbewegung keine Ausnahme des axiomatischen Satzes der Proportionalität von Be-

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz. c. 1840 bis c. 1850.

wegung und Kraftaufwand begründet. Null ist der Kraftaufwand bloss dann, wenn ein Gewicht nur drückt und nicht zugleich sich senkt. Eine constante Kraft, eine solche, welche Wirkung äussert, ohne abzunehmen, giebt es für den Physiker nicht."

Zu Bewegung, Fallkraft und Wärme gesellt sich als eine vierte Erscheinungsform der physikalischen Kraft die Elektricität; auch die Reibungs- und die Vertheilungselektricität wird immer unter dem Aufwande von mechanischem Effect erzeugt. Denken wir uns den Deckel eines Elektrophors durch ein Gegengewicht balancirt, so wird derselbe ohne jeden Kraftaufwand pendelartig auf und ab sich bewegen können. Denken wir dann, wenn der Deckel in seinen tiefsten Punkt gekommen, demselben die elektrisirte Unterscheibe in entsprechender Entfernung unterstellt, so wird diese den Deckel anziehen, das Gegengewicht heben und somit einen kleinen Gewinn an Fallkraft erzeugen. Entnehmen wir dann dem Deckel einen Funken, so wird die Anziehung stärker, und um den Deckel wieder zu heben, werden wir nicht bloss die gewonnene Fallkraft, sondern einen Ueberschuss an Kraft aufwenden müssen. Dafür können wir dem gehobenen Deckel einen zweiten Funken entziehen, nachdem erst alles in den primitiven Zustand zurückgekehrt ist. Dann sind also mit einem Aufwand von mechanischer Kraft zwei elektrische Effecte erzielt, und die Summe dieser Effecte muss geradeauf jener consumirten mechanischen Kraft gleich sein. Zu entsprechenden Ergebnissen kommt man bei der Erzeugung der Reibungselektricität. „Die sich berührenden Stoffe halten sich mit den gebildeten entgegengesetzten Elektricitäten fest; die zur Erregung elektrischer Effecte nothwendige Trennung dieser Stoffe kann ohne Aufwand an mechanischem Effecte nicht vor sich gehen. Bekannt ist auch, dass bei der Bildung von Reibungselektricität die Reibungswärme fehlt. Bei der „Mittheilung" der Elektricität kehren sich die soeben erörterten Anziehungsverhältnisse um, und es wird unter einem Aufwand von elektrischer Kraft mechanischer Effect erzeugt. Bei jeder Mittheilung wird ein Theil der Elektricität, wie die Bewegung beim unelastischen Stosse neutralisirt."

„Der Elektricitäts-Erzeugung ganz analog lässt sich der Magnetismus unter Aufwand von mechanischem Effect durch Vertheilung erregen. Der gegebene Magnet spielt die Rolle des Elektrophors."

Denselben Effect wie das Zusammenstossen bewegter Massen, nämlich Wärme, liefert auch die chemische Verbindung gewisser Materien, also ist auch „das chemisch-getrennt Vorhandensein oder kürzer die chemische Differenz der Materie eine Kraft. Die chemische Verbindung von 1 g Kohlenstoff und 2,6 g Sauerstoff ist nahezu äquivalent der mechanischen Verbindung von $^1/_2$ g Gewicht mit der Erde (d. h. der Fallkraft eines unendlich weit von der Erde entfernten halben Gramms); durch beide werden 8500° resp. 7400° Wärme erhalten. Die chemische Verbindung von 1 g Wasserstoff (die Verbrennungswärme des-

selben nach Dulong = 34 743° angenommen) mit 8 g Sauerstoff ist nahe äquivalent der mechanischen Verbindung von 2 g Gewicht mit der Erde."

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

„Wenn für kleine Raumabstände und Geschwindigkeiten die Energien der mechanischen Effecte, den ausgezeichneteren chemischen Kräften gegenüber, sehr in den Hintergrund treten, so finden wir umgekehrte Verhältnisse, wenn wir die Blicke über unsere Umgebungen hinweg den Himmelsräumen zuwenden. . . . Die Erde bewegt sich in ihrer Bahn mit einer mittleren Geschwindigkeit von 93 700′. Um diese Bewegung durch Verbrennung von Kohlenstoff zu erzeugen, müsste das 13 fache Gewicht der Erde als Kohle verbrannt werden, und die dadurch entbundene Wärmemenge würde wiederum hinreichen, um ein der Erde gleich schweres Quantum Wasser auf 110 000° zu erhöhen; ein kleiner Theil der Kraft, mit der die Erde sich in ihrer Bahn bewegt, wäre mithin im Stande, allen mechanischen Zusammenhang der irdischen Massentheile völlig aufzuheben. — Angenommen aber, eine der Erde gleich schwere Masse liege ruhend auf der Sonnenoberfläche, so wäre, um diese Last in die Entfernung zu heben, in welcher unsere Erde sich befindet, und um ihr hier die Geschwindigkeit von 93 700′ zu ertheilen (die Entfernung der Erde = 215 Sonnenhalbmesser gesetzt), ein noch 429 mal grösserer Kraftaufwand oder ein 5557 faches Gewicht der Erde an Kohlenstoff erforderlich u. s. w. Da die chemischen Kräfte zur Hervorbringung solcher Effecte als unzureichend erscheinen, so kann gefragt werden, wie man sich einen Kraftaufwand vorstellen könnne, der die planetarischen Bewegungen einstens möchte hervorgebracht haben? Angenommen: Die Erde sei „„am Anfang"" 430 Sonnenhalbmesser vom Mittelpunkte der Sonne entfernt und ruhend gewesen und von hier aus 215 Halbmesser gegen die Sonne bis in ihre nunmehrige Entfernung herabgefallen, so müsste sie durch diesen Fall ihre jetzige Bewegungsgrösse erlangt haben. Das Nämliche lässt sich von allen Planeten sagen. Die grossen Axen ihrer Bahnen geben das Maass für die ursprünglich gegebene Entfernung der zuerst als ruhend gedachten Himmelskörper; die grossen Axen sind der Ausdruck für die von dem Schöpfer jedem Planeten gegebene Grösse des mechanischen Effects; sie stehen fest wie die Vergangenheit."

Chemische Differenz ist auch die Quelle der Kraft in der Volta'schen Säule; „die Reductionserscheinungen und die Entwicklung von Wärme und mechanischem Effect, welche wir als Wirkungen der Säule auftreten sehen, verdanken ihre Entstehung dem Aufwande einer Kraft, dem gegebenen Abstand von Metall und Sauerstoff, von Salz und Säure". Aus alledem aber folgt sicher das schon im Anfang der Schrift ausgesprochene Axiom: „Bei allen physikalischen und chemischen Vorgängen bleibt die gegebene Kraft eine constante Grösse." Mayer ist sich vollkommen klar über die Umwälzungen, welche dieser Satz in den fundamentalen Anschauungen der

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Physiker hervorrufen muss und drückt das in den überzeugten, begeisterten Worten aus: „Während wir der Bewegung das Recht zu sein, die Substanzialität, alta voce vindiciren, müssen wir der Wärme und der Elektricität eine Materialität unbedingt absprechen [1]). Denn wäre es nicht gar zu ungereimt, das Wesen der Bewegung und des räumlichen Abstandes der Massen in einem Fluidum suchen, oder ein abwechselnd bald materiell — bald immateriell — Sein eines und desselben Objectes statuiren zu wollen? Sprechen wir es aus, die grosse Wahrheit: „„Es giebt keine immateriellen Materien.““ Wohl fühlen wir, dass wir mit den eingewurzeltsten, durch grosse Autoritäten kanonisirten Hypothesen in den Kampf gehen, dass wir mit den Imponderabilien die letzten Reste der Götter Griechenlands aus der Naturlehre verbannen wollen; aber wir wissen auch, dass die Natur in ihrer einfachen Wahrheit grösser und herrlicher ist, als jedes Gebild von Menschenhand und als alle Illusionen des erschaffenen Geistes.“

Erst nach dieser allgemeinen theoretischen Einleitung kommt Mayer zu dem eigentlichen Thema seiner zweiten Abhandlung, den Kräften organischer Wesen. Dabei scheint er noch zweierlei Ziele gehabt zu haben. Erstens der Hauptaufgabe zu genügen, nun das Gesetz von der Erhaltung der Kraft in dem schwierigsten Gebiete, dem zweifelhaftesten der Natur, im Leben und Weben der

---

[1]) Mayer hat in seiner ersten Abhandlung den allerdings unklaren Satz: „So wenig indessen aus dem zwischen Fallkraft und Bewegung bestehenden Zusammenhange geschlossen werden kann: Das Wesen der Fallkraft sei Bewegung, so wenig gilt dieser Schluss für die Wärme. Wir möchten vielmehr das Gegentheil folgern, dass, um zu Wärme werden zu können, die Bewegung — sei sie eine einfache, oder eine vibrirende, wie das Licht, die strahlende Wärme etc. — aufhören müsse, Bewegung zu sein“ (Mechanik der Wärme, Stuttgart 1874, S. 9 bis 10). Tait benutzt diesen Satz in seinen „Vorlesungen über einige neuere Fortschritte der Physik“ (Braunschweig 1877, S. 47 bis 48), um zu beweisen, dass Mayer keinesfalls („ohne den Thatsachen ins Gesicht zu schlagen“) als Entdecker der neueren Wärmetheorie genannt werden darf. Er citirt den obigen Satz (unvollständig) mit dem Bemerken: „Ausserdem aber glaubte Mayer nicht einmal, dass die Wärme von der Bewegung abhängt, und dies ist vielleicht der beste Commentar, den man über die Consequenz derer machen kann, welche beständig von der Wärme als „„einer Art der Bewegung““ sprechen und dabei ihn als Entdecker der neueren Wärmetheorie nennen. . . . Mayer sagt selbst in seiner ersten Arbeit, ohne, so weit mir bekannt ist, diesen Ausspruch später zu modificiren:“ Es ist bezeichnend, dass Tait bei seinen unmässig heftigen Angriffen auf Mayer nicht einmal die im Text abgedruckte, vollkommen genügende Modification des fraglichen Satzes kennt, obgleich dieselbe noch vor dem Erscheinen von Tait's Schrift vom Jahre 1877 dreimal, in den Jahren 1845 (die organische Bewegung, Heilbronn 1845, S. 36), 1867 und 1874 (Mechanik der Wärme, 2. Aufl., Stuttgart 1874, S. 52) in Mayer's Schriften abgedruckt worden ist.

Menschen, Thiere und Pflanzen nachzuweisen, zweitens aber auch seine Arbeiten und seine Naturauffassung seinen Specialcollegen, den Aerzten, nahe zu bringen und unter ihnen fruchtbar zu machen.

Erhaltung der Kraft. Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

„Die Sonne“, so fährt er nun fort, „ist eine nach menschlichen Begriffen unerschöpfliche Quelle physischer Kraft. Der Strom dieser Kraft, der sich auch über unsere Erde ergiesst, ist die beständig sich spannende Feder, die das Getriebe irdischer Thätigkeiten im Gange erhält.... Die Zeit liegt nicht ferne hinter uns, wo die Streitfrage verhandelt wurde, ob die Pflanze während des Lebens chemische Urstoffe zu verwandeln, oder gar zu erzeugen im Stande sei.“ Wie man aber für die Materie die Unmöglichkeit einer Neuschaffung auch in den Organismen als Naturgesetz längst angenommen, so muss dies in ganz derselben Weise nun auch für die Kraft geschehen. Die alltägliche Erfahrung lehrt, „dass die erhitzende Wirkung der Sonnenstrahlen auf weite Flächen Landes durch nichts so sehr gehemmt wird, als durch eine reiche Vegetation, obgleich die Pflanzen der dunklen Farbe ihrer Blätter wegen einen grösseren Theil des auf sie fallenden Sonnenlichtes aufnehmen müssen, als der kahle Boden“. Andererseits findet man in allen Pflanzen eine Summe von Kraft als chemische Differenz aufgespeichert, die man bei der Verbrennung der Pflanzen vollständig verwerthen kann. Das Gesetz des logischen Grundes nöthigt uns, diese Consumption von Sonnenwärme mit der Aufspeicherung von chemischer Kraft in Causalzusammenhang zu bringen, und jedenfalls darf man den Satz als eine axiomatische Wahrheit annehmen, dass „während des Lebensprocesses nur eine Umwandlung, so wie der Materie, so der Kraft, niemals aber eine Erschaffung der einen oder der anderen vor sich gehe“. Auf welche Weise freilich die Pflanzen die Kraft ihrer chemischen Differenz weiter verwenden, wie viel wieder zu freier Wärme, wie viel zur Unterhaltung der Lebensprocesse verwandt wird, über diesen noch dunklen Gegenstand können nur fortgesetzte physiologisch-chemische Untersuchungen und genaue experimentale Bestimmungen der Verbrennungswärme vegetabilischer Substanzen das gehörige Licht verbreiten.

„Die durch die Thätigkeit der Pflanzen angesammelte physische Kraft fällt einer anderen Classe von Geschöpfen anheim, die den Vorrath durch Raub sich zueignen und ihn zu individuellen Zwecken verwenden. Es sind dieses die Thiere. Das lebende Thier nimmt fortwährend aus dem Pflanzenreiche stammende brennbare Stoffe in sich auf, um sie mit dem Sauerstoff der Atmosphäre wieder zu verbinden. Parallel diesem Aufwande läuft die das Thierleben charakterisirende Leistung: Die Hervorbringung mechanischer Effecte, die Erzeugung von Bewegungen, die Hebung von Lasten. . . . In dem Thierorganismus wird fortwährend eine Summe von chemischen Kräften aufgewendet. Ternäre und quaternäre Verbindungen erleiden während des Lebens in ihrer

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Zusammensetzung die wichtigsten Veränderungen und werden grossentheils in Form binärer Verbindungen, als verbrannte Stoffe, nach kurzem Verweilen wieder ausgeschieden." Die Wärmemenge, welche durch diese Processe geliefert werden kann, ist auf experimentalem Wege keineswegs genügend eruirt; hier, wo es sich nur um Feststellung eines Princips handelt, kann eine Schätzung genügen. Man rechnet, dass ein Pferd durch die Anstrengung seiner willkürlichen Muskeln acht Stunden lang des Tages in jeder Minute 4400 kg einen Meter hoch zu heben im Stande ist. Die Verbrennungswärme des Kohlenstoffes setzen wir nach Dulong = 8558°, die Lasterhebung, welche der Verbrennung von einem Gewichtstheil Kohlenstoff entspricht, = 3 600 000 Gewichtstheile auf 1 m Höhe. „Drückt man nun den Aufwand an chemischer Differenz, den ein Pferd zur Hervorbringung obiger Leistung machen muss, durch ein Gewicht von Kohlenstoff aus, so findet man, dass das Thier in einem Tage 580 g, in einer Arbeitsstunde, den Tag zu acht Stunden gerechnet, 72 g, in einer Minute 1,2 g Kohlenstoff zu mechanischen Zwecken verbraucht. Nach gangbaren Bestimmungen ist die Leistung eines starken Arbeiters $^1/_7$ von der eines Pferdes. Ein Mann, der in einem Tage 300 000 kg 1 m hoch hebt, muss hierzu 83 g Kohlenstoff verwenden. Dieses beträgt für eine Arbeitsstunde 10 g, für eine Minute 170 mg Kohlenstoff. Ein Kegelspieler, der eine 4 kg schwere Kugel mit einer Geschwindigkeit von 10 m abwirft, verwendet zu dieser Arbeit von 20 mkg, da der Verbrennungseffect von 1 mg $C$ = 3,6 mkg ist, 6 mg Kohlenstoff; ein Mann, der sein Körpergewicht von 72 kg 5 m hoch hebt, verbraucht dazu 0,1 g Kohlenstoff; beim Besteigen eines 3000 m hohen Berges beträgt der Aufwand dieses Mannes, den bei jedem Tritte durch unelastischen Stoss verloren gehenden mechanischen Effect ungerechnet, 60 g Kohlenstoff. Wenn der animalische Organismus den disponibeln Brennstoff einzig zu m e c h a n i s c h e n Z w e c k e n verwenden würde, so müssten die berechneten Kohlenstoffmengen für die angegebenen Zeiten hinreichen. In Wirklichkeit kommt aber zu der Production mechanischer Effecte im Thierkörper noch eine beständige W ä r m e e r z e u g u n g. Die chemische Kraft, welche in den eingeführten Nahrungsmitteln und in dem eingeathmeten Sauerstoffe enthalten ist, ist also die Quelle zweier Kraftäusserungen, der Bewegung und der Wärme, und die Summe der von einem Thiere producirten physischen Kräfte ist gleich der Grösse des gleichzeitig erfolgenden chemischen Processes. Sammelt man die in einer gewissen Zeit von einem Thiere gelieferten mechanischen Kraftäusserungen, verwandelt dieselben durch Reibung oder sonst auf eine Weise in Wärme, und addirt hierzu die in gleicher Zeit von dem Körper unmittelbar entwickelte Wärme, so wird man genau die Wärmemenge erhalten, welche dem stattgehabten chemischen Processe an und für sich entspricht. Auf der einen oder der anderen Seite ein Plus oder Minus anzunehmen, verbietet das Gesetz des logischen Grundes." Die einzige Ursache der thierischen Wärme und Arbeitsfähigkeit ist ein

chemischer Process, in specie ein Oxydationsprocess. Wenn Dulong und Despretz gefunden haben, dass die producirte thierische Wärme der Verbrennungswärme des in den Körpern enthaltenen Kohlenstoffs und Wasserstoffs ungefähr gleich sei, so kann das nur daher rühren, dass sie diese Verbrennungswärme zu klein annahmen [1]).

Erhaltung der Kraft. Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

„Um die Verwandlung von chemischer Kraft in mechanischen Effect bewerkstelligen zu können, dazu sind die Thiere mit speciellen Organen ausgerüstet, deren die Pflanzen gänzlich ermangeln. Es sind dieses die Muskeln. Zur Thätigkeitsäusserung eines Muskels gehört zweierlei: 1) Der Einfluss eines motorischen Nerven als Bedingung, und 2) der Stoffwechsel als Ursache der Leistung. . . . Der Muskel ist das Werkzeug, mittelst dessen die Umwandlung der Kraft erzielt wird, aber er ist nicht der zur Hervorbringung der Leistung umgesetzte Stoff. Die dauernde Leistungsfähigkeit eines Muskels ist darum nicht der Masse desselben, sondern der Masse des durchkreisenden Blutes proportional. Die in den Capillaren des Körpers allenthalben vor sich gehende Oxydation von Brennmaterial erzeugt eine entsprechende Menge von Wärme. Der ruhende Muskel verhält sich hier wie jeder andere bewegungslose Theil, der thätige Muskel dagegen verwendet Brennmaterial zur Production mechanischer Effecte. Bei jeder Muskelaction wird Wärme im status nascens „„latent"". . . . Der Wärmeausfall während der Arbeit würde weit bemerkbarer sein, und die Leistungsfähigkeit der willkürlichen Muskeln wäre in enge Grenzen eingeschlossen, wenn nicht während der Arbeit sowohl örtlich als allgemein der chemische Process erhöht wäre. . . . Die Respirations- und Circulationsbewegungen werden reflectorisch erhöht, wenn der Organismus mechanische Effecte producirt; bei jeder angestrengten Arbeit beschleunigen sich Athem und Herzschlag, und zwar für eine gleiche Leistung aus leicht begreiflichen Gründen um so stärker, je schwächer der chemische Process in dem ruhenden Individuum vor sich geht; eine Leistung, die dem Kräftigen nur wenige Athemzüge kostet, kann in blutleeren, chlorotischen, cyanotischen, scorbutischen Subjecten turbulente Vermehrung der Respiration und Circulation, Erstickungszufälle und Herzzappeln hervorrufen."

Bei alledem darf Anstrengung (wenn man das Gesetz von der Erhaltung der Kraft begreifen will) nicht verwechselt werden mit der Leistung. Die Leistung eines Mannes, der mit grosser Anstrengung ein Gewicht frei hält, oder stundenlang unbeweglich gerade steht etc.,

[1]) Komisch ist die Ansicht der sogenannten Vitalisten, die, wie Reich (Lehrb. d. prakt. Heilkunde nach chemisch-rationellen (?) Grundsätzen, Berlin 1842), die thierische Wärme für ein Erbstück halten, das dem Neugebornen von den Eltern mit auf den Lebensweg gegeben wird. „Für diesen heiteren Gedanken wünschen wir besagten Herren einen Stubenofen, der die vom Vater Hochofen überkommene Wärme spende für und für." (Mechanik d. Wärme, S. 67.)

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

ist = Null; ein Gleiches, ja noch viel mehr, kann auch ein eiserner Haken vollbringen. Die Ermüdung scheint hier von dem anhaltenden Druck auf die Nervenverzweigungen herzurühren. Eine solche Ermüdung ohne Leistung schliesst auch die weitere Leistungsfähigkeit nicht aus, und der Gelehrte z. B., welcher gegen die Regeln der Diätetik den Tag über an seinem Pulte sich müde gestanden, besteigt am Abend zu seiner Erholung noch einen nahe gelegenen Berg.

Nachdem auf diese Weise gezeigt, dass auch in der organischen Welt niemals eine ursprüngliche Erzeugung, eine Erschaffung von Kraft stattfindet, nachdem bewiesen, dass alle Arbeitsfähigkeit der Thiere und Menschen nur durch eine Umwandlung der von den Pflanzen aufgespeicherten Sonnenkraft möglich ist, sucht Mayer nun sein Problem weiter rückwärts zu verfolgen und auch für die Energie der Sonne noch eine Quelle aufzuzeigen. In der That, soll das Gesetz von der Erhaltung der Kraft für das ganze Universum möglich sein, so darf auch die Sonne nicht als ein unversiegbarer Quell von Kraft angesehen und gerade für sie muss nothwendig nachgewiesen werden, welche Stellung dieses ungeheure Kräftereservoir im allgemeinen Kreislauf der Naturkräfte einnimmt. Diese Aufgabe bemühte sich Mayer, drei Jahre nach seiner zweiten Abhandlung, in einer dritten Schrift zu lösen, die unter dem Titel „Beiträge zur Dynamik des Himmels in populärer Darstellung“ im Jahre 1848 wieder wie die zweite in Heilbronn auf eigene Kosten Mayer's erschien [1].

„Das Licht besteht, so beginnt die Abhandlung, wie der Schall, in Schwingungen, die sich von dem leuchtenden oder tönenden Körper wellenartig auf ein umgebendes Medium ausbreiten. Es ist nun vollkommen klar, dass ein Körper nur dann seiner Umgebung eine solche erzitternde Bewegung zu ertheilen vermag, wenn er sich selbst in einer ähnlichen Bewegung befindet; denn wo ein Körper im Zustande der Ruhe oder im Gleichgewichte mit seiner Umgebung ist, da ist eine Ursache zu wellenförmiger Bewegung nicht vorhanden. Soll eine Glocke oder eine Saite tönen, so muss durch eine äussere Gewalt die Glocke angeschlagen oder die Saite in Schwingung versetzt werden, und diese Gewalt ist die Ursache des Tones. . . . Man hat oft und passend die Sonne mit einer immerfort tönenden Glocke verglichen. Wodurch wird aber dieser Himmelskörper, der auf eine so grossartige und herrliche Weise die Räume des Weltalls mit seinen Strahlen erfüllt, wodurch wird er in ewig ungeschwächter Kraft und Jugend erhalten? Wodurch wird einer endlichen Erschöpfung, einem Zustande des Gleichgewichts vorgebeugt, damit nicht Nacht und Todeskälte die Räume des Planetensystems erfülle? Als allgemeines Naturgesetz, von dem keine Ausnahme stattfindet, gilt der Satz, dass zur Erzeugung von Wärme ein gewisser Aufwand erforderlich ist. Dieser Aufwand, so verschiedenartig er

[1]) Abgedruckt in „Mechanik der Wärme“, Stuttgart 1874, S. 155 bis 242.

sonst sein mag, lässt sich immer auf zwei Hauptkategorien zurückführen; es besteht derselbe nämlich entweder in einem chemischen Material oder in einer mechanischen Arbeit.“ In diesen beiden Agentien ist also die Quelle der Sonnenwärme zu suchen, und zwischen diesen beiden ist, wenn man Hypothesen über diese Quelle bilden will, zu entscheiden. Dazu ist vor Allem nöthig, dass man zuerst die Grösse der von der Sonne in einer gewissen Zeit ausgestrahlten Wärmemengen kennt.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz. c. 1840 bis c. 1850.

Nach Herschel ist die erwärmende Kraft der Sonne so gross, dass durch diese Wärme auf der Erdoberfläche jährlich eine 29,2 m dicke Eisschicht geschmolzen werden könnte, nach Pouillet's neueren Messungen würde die Dicke dieser Eisschicht 30,89 m betragen. Aus dieser letzteren Angabe berechnet man den ganzen strahlenden Effect der Sonne per Minute auf 12 650 Millionen Grosscalorien, wo der kleineren Zahlen wegen eine Grosscalorie gleich der Wärmemenge, welche eine Cubikmeile Wasser um 1° C. in ihrer Temperatur erhöht, oder gleich 408,54 Billionen Calorien gesetzt wird. Wäre nun die Wärmecapacität der Sonnenmaterie gleich der grössten Capacität, welche wir an bekannten Stoffen gemessen haben, nämlich gleich der des Wassers, so würde selbst, wenn wir den Wärmeverlust der Sonne auf die ganze Materie derselben vertheilen, die jährliche Abkühlung der Sonne 1,8° C. oder die Gesammtabkühlung derselben in der geschichtlichen Zeit (5000 Jahren) 9000° betragen. Aus dieser Zahl, die übrigens wegen ungleich stärkerer Abkühlung der Sonnenrinde von ungleich grösserer Wirkung ist, lässt sich „mit mathematischer Gewissheit auf einen dem grossartigen Verbrauch entsprechenden Wiederersatz schliessen“.

Durch einen Verbrennungsprocess kann der immerwährende Wärmeverlust der Sonne aber jedenfalls nicht gedeckt werden. Angenommen, die Sonne sei ein Klumpen von Steinkohlen, wovon jedes Kilogramm beim Verbrennen 6000 Wärmeeinheiten liefert, so könnte dieselbe doch nur 4600 Jahre den gesammten Wärmeaufwand durch ihren Brand bestreiten. Auch die Achsendrehung der Sonne kann nicht die Quelle ihrer Wärme sein, denn zur Verwandlung dieser mechanischen Kraft in Wärme wäre ein zweiter, der Drehung widerstehender Körper nothwendig. Und selbst diesen vorausgesetzt, würde der ganze Rotationseffect der Sonne (ihre Dichte als gleichförmig, ihre Rotationsdauer zu 25 Tagen angenommen) von 182 300 Quinquillionen Meterkilogramm den Wärmeverbrauch nur auf 158 Jahre decken. Anders verhält sich die Sache, wenn wir die Sonne nicht für sich allein, sondern als ein Glied des Universums betrachten. Unser Sonnensystem durchlaufen ausser den bis jetzt bekannten Planeten und ihren 18 Trabanten eine grosse Anzahl von Kometen, deren es nach Kepler's berühmtem Ausspruch im Himmelsraum mehr giebt als Fische im Ocean; dazu kommen noch die Asteroiden, deren Zahl nach der Menge der in unserer Erdatmosphäre beobachteten Sternschnuppen und Feuerkugeln ins Grenzen-

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

lose sich verlieren muss. Wäre der Himmelsraum absolut leer an Materie, so würden alle diese Körper die Sonne in immer sich wiederholender Regelmässigkeit umkreisen. Das aber ist schlechterdings unmöglich. Die Verkürzung der Umlaufszeit des Enke'schen Kometen lässt sicher auf ein den Himmelsraum anfüllendes, widerstehendes Medium schliessen, und Littrow sagt hierüber, übereinstimmend mit den Naturforschern: „Wenn es in dem Weltenraume auch keine andere flüssige Materie gäbe als die, welche zur Existenz des Lichtes nothwendig ist (dieses Licht mag nun nach der Emissionstheorie selbst materiell sein, oder nach der Undulationslehre in den Schwingungen eines überall verbreiteten Aethers bestehen), so ist dieses allein schon hinlänglich, die Bewegungen der Planeten in einem solchen Medium in der Folge der Zeiten und damit die Anordnung des Systemes selbst gänzlich zu ändern, ja die gegenwärtige Einrichtung desselben ganz aufzuheben, da die endliche Folge eines solchen widerstehenden Mittels das Herabstürzen aller Planeten und Kometen auf die Sonne sein muss." Von allen Seiten her muss sich also langsam aber unaufhörlich ein unermesslicher Strom wägbarer Substanzen der Sonne zuwälzen und muss bei seinem Auftreffen auf die Sonne die mechanische Kraft seiner Bewegung in Wärme umwandeln. Zur Berechnung der dabei entstehenden Wärmemengen dienen folgende Betrachtungen. Ein schwerer Körper, der aus unendlicher Entfernung auf einen Weltkörper herabfällt, erlangt dabei die Maximalgeschwindigkeit $\sqrt{2gr}$ [1]); für die Sonnenoberfläche beträgt diese Zahl $G = 630\,400$ m, welchen Werth man als die Charakteristik des Sonnensystems bezeichnen könnte. Kommt der schwere Körper nicht aus unendlicher Entfernung, sondern fällt nur aus der Höhe $h$, so wird er auf der Oberfläche der Sonne mit der Geschwindigkeit $c = G \cdot \sqrt{\frac{h-r}{h}}$ auftreffen, der hierdurch entstehende Wärmeeffect berechnet sich auf $0{,}00012^0\ c^2$. Asteroidmassen, deren Geschwindigkeiten beim Auftreffen auf die Sonne je nach ihren Entfernungen von derselben zwischen 445 750 und 630 400 m schwanken würden, könnten also durch ihr Auffallen auf der Sonne einen Wärmeeffect von 24 bis 48 Millionen Grad erzeugen, d. i. 4000- bis 8000 mal so viel, als der Verbrennungswerth einer gleich grossen Masse von Steinkohlen beträgt.

Da die Sonne in jeder Minute 12 650 Millionen Gross-Calorien oder 5,17 Quadrillionen Wärmeeinheiten ausstrahlt, so müsste nach Obigem die Quantität der in jedem Augenblick auf die Sonne niedersteigenden

[1]) Nimmt man, wie das für grosse Fallräume nothwendig, die Schwere nach dem Newton'schen Gesetz als mit der Entfernung veränderlich an, so erhält man für die Fallgeschwindigkeit eines Körpers, der aus der Höhe $h$ auf einen Weltkörper vom Radius $r$ und einer an der Oberfläche stattfindenden Beschleunigung $g$ gefallen ist, die Formel $v^2 = 2gr \cdot \frac{h-r}{h}$.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Materien zwischen 100 000 und 200 000 Billionen Kilogramme betragen. Diese auf den ersten Blick unglaublich gross erscheinende Zahl wird in das richtige Verhältniss gerückt, wenn wir bedenken, dass der Mond mit einer Masse von 90 000 Trillionen Kilogrammen durch seinen Fall die Wärmeausstrahlung der Sonne auf 1 bis 2 Jahre, die Erde aber entsprechend schon auf 50 bis 100 Jahre decken könnte. Der zur Ausgleichung des Wärmeverlustes auf der Sonne nothwendige Asteroidenstrom würde dann jeden Quadratmeter der Sonnenoberfläche mit einer Masse von 17 bis 34 g per Minute bedecken. Die hierdurch entstehende Vergrösserung des Sonnendurchmessers würde allerdings erst in 28 500 bis 57 000 Jahren eine einzige Bogensecunde, also einen merklichen Werth, erreichen; dagegen müsste die Umlaufszeit der Erde und damit die Länge des siderischen Jahres um die empfindlichere Grösse von $^{7}/_{8}$ bis $^{1}/_{2}$ Zeitsecunde jährlich sich verkürzen. Da nun von einer solchen Abnahme nichts zu bemerken ist, so muss man einen beständigen Wechsel von Zu- und Abfluss in der Sonne annehmen, was auch am besten mit dem Gesetz von der Erhaltung der Kraft harmonirt. Schliesslich führt Mayer für das Stattfinden eines Einströmens von Meteormassen in die Sonne noch an, dass man die Sonnenflecken und Sonnenfackeln wohl am wahrscheinlichsten als Wirkungen solcher Meteoritenströme erklärt und dass die Flecken und Fackeln sich wirklich, wie man das aus den herrschenden Ansichten von unserem Sonnensysteme für das Auftreffen der Asteroiden deduciren müsste, nur in einer $30^0$ breiten Zone zu beiden Seiten des Sonnenäquators vorfinden [1]).

Mit der eben besprochenen Arbeit schliesst die Reihe der fundamentalen Abhandlungen Mayer's. Zwar war sein Thema noch keineswegs nach allen Seiten erschöpft, aber es waren doch fast überall die neuen Wege angezeigt, auf welchen man die Früchte seiner Arbeit ernten konnte. Er hat danach, d. h. nach dem Jahre 1848, nichts eigentlich Neues mehr gegeben [2]). Die nächste Ursache davon, dass er

---

[1]) Eine irdische Kraftquelle, auf die Mayer noch zurückkommt, die Ebbe und Fluth, ist nicht von der Sonnenwärme, sondern von der lebendigen Kraft der rotirenden Erde abhängig. Mayer betont, dass auch diese Kraft, insofern sie Widerstände zu überwinden hat, sich nach und nach erschöpfen muss und dass dies durch eine Verzögerung der Rotationsgeschwindigkeit der Erde, wie durch eine Veränderung der Umlaufszeit des Mondes geschieht. Die erstere berechnet er auf $^{1}/_{16}$ Secunde in 2500 Jahren, für die zweite erhält er einen noch viel geringeren Werth. Nach Prof. A. Fick (Pogg. Ann. CXXVI, S. 660) hat man Mayer mit Unrecht die Priorität für diese letzteren Ideen zugeschrieben, da Kant schon 1754 in der Abhandlung „Untersuchung der Frage, welche von der Königl. Akad. der Wissenschaften zu Berlin zum Preise für das jetzt laufende Jahr aufgegeben worden: Ob die Erde eine Veränderung ihrer Achsenlänge erlitten hat?“ (Kant's Werke, herausgegeben von Hartenstein, Bd. VIII) dieselben Gedanken entwickelt hat.

[2]) Eine populäre Abhandlung „Bemerkungen über das mechanische Aequivalent der Wärme“ (Heilbronn 1851; abgedruckt in „Mechanik der Wärme“, Stuttgart 1874, S. 243 bis 302) geht noch einmal schärfer auf den

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

selbst seine Ideen nicht noch weiter auswerthete, lag jedenfalls in den widrigen persönlichen Schicksalen, die ihn bald nach jener Zeit trafen. Lange Zeit aber fehlte ihm bei mangelnder Anerkennung auch die Anregung, und es ist von dieser Seite her unendlich zu bedauern, dass keine Universität, keine Akademie, keine Regierung ihn und seine Arbeit durch ein Amt rechtzeitig an das Gebiet gefesselt hat, auf dem er in höchster Weise schaffend sich gezeigt.

Nur eine ganz kleine Abhandlung vom Jahre 1876 [1]), die acht Seiten Umfang hat, greift noch einmal das Grundthema in einer Weise fortentwickelnd auf, wie sie wieder bis dahin nicht gedacht und auch bis jetzt noch kaum verstanden und gewürdigt ist. Alle Kräfte sind wechselseitig nach bestimmten Verhältnissen in einander wandelbar, das sagt das Gesetz von der Erhaltung der Kraft. Aber was es nicht sagt, ist das Weitere, dass nämlich keine dieser Umwandlungen, keine dieser Kräftetransformationen ohne Weiteres vor sich geht. Keine Kraft, das ist ebenso sicher als das Gesetz von der Erhaltung der Kraft, wandelt sich von selbst um, zu jeder Verwandlung einer Kraftform in eine andere bedarf es einer äusseren Ursache. Ja bei dieser Umwandlung verhalten sich die Kräfte sogar noch sehr verschieden. Die lebendige Kraft der Bewegung transformirt sich an jedem Hinderniss, das ihr entgegensteht, das der Bewegung widersteht. Die sogenannten Anziehungs- und Abstossungskräfte aber bedürfen umgekehrt die Entfernung eines Hindernisses, um zur Wirkung und damit zur Transformation zu kommen. Diese Entfernung eines Hindernisses, die Befreiung einer Spannkraft von ihrer Fessel bezeichnet Mayer allgemein mit dem Namen Auslösung, und solche Vorgänge sind es, welche er in der betreffenden Abhandlung mehr andeutend als ausführend bespricht. Der Satz: causa aequat effectum, auf den das Gesetz von der Erhaltung der Kraft gegründet ist, gilt danach nicht mehr, wenn wir die Namen Ursache und Wirkung auch auf die Auslösungen übertragen, weil bei diesen diese Namen in ganz anderem Sinne gebraucht werden. Die auslösende Kraft ist nicht die Ursache der Wirkung in dem dort gebrauchten Sinne, sondern die Ursache für den Uebergang der Ursache in die Wirkung. Wir könnten diese auslösenden Ursachen als Ursachen zweiter Ordnung bezeichnen, und es liesse sich wohl auf sie das Gesetz von der Erhaltung der Kraft anwenden, wenn man für sicher annehmen dürfte, dass die kleine auslösende Kraft, welche eine Spannkraft in Bewegung umwandelt, vorher schon einmal im entgegengesetzten Sinne bei der Umwandlung der lebendigen

---

neuen Kraftbegriff ein und polemisirt heftiger gegen die sogenannte Newton'sche Auffassung der Kraft, macht aber principiell keine weiteren Fortschritte.

[1]) Die Toricelli'sche Leere und über Auslösung von J. R. Mayer, Stuttgart 1876; über Auslösung, S. 8 bis 16.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Kraft der Bewegung in Spannkraft verbraucht worden wäre. Indessen geht gerade hierauf Mayer nicht ein. Er betont nur, dass das Gesetz von der Erhaltung der Kraft an den auslösenden Kräften eine Grenze finden müsse, weil nie ein Verhältniss zwischen der Grösse der ausgelösten und der dazu nöthigen auslösenden Kräfte festzustellen sei, was wohl so sicher nicht auszusprechen ist. „Die zahllosen Auslösungsprocesse, sagt er S. 11, haben nun das unterscheidende Merkmal gemein, dass bei denselben nicht mehr nach Einheiten zu zählen ist, mithin die Auslösung überhaupt kein Gegenstand mehr für die Mathematik ist. Das Gebiet der Mathematik hat, wie jedes andere Reich auch, seine natürlichen Grenzen, und unser jetziges Gebiet liegt eben ausserhalb dieser Grenze. Die unendliche Menge von Auslösungsvorgängen entziehen sich jeder Berechnung, denn Qualitäten lassen sich nicht wie Quantitäten numerisch bestimmen.“ Jedenfalls denkt Mayer hier vor Allem an die Auslösungen thierischer und menschlicher Bewegungen und Empfindungen. Dafür zeugen die folgenden Ausführungen, die zugleich ein lebhaftes Bild von der Kühnheit der Gedankencombinationen des genialen Arztes und Physikers geben. „Treten wir in die lebende Welt ein, so sehen wir, dass unser ganzes Leben an einen ununterbrochenen Auslösungsprocess geknüpft ist. . . . Die während des Lebens beständig vor sich gehenden Bewegungserscheinungen beruhen alle auf Auslösung. . . . Die willkürlichen Bewegungen entstehen bekanntlich durch Contraction quergestreifter Muskelfasern; die Auslösung aber erfolgt durch die Einwirkung der ganglienfreien motorischen Nerven. . . . Der Wille wird, freilich auf eine völlig räthselhafte und unbegreifliche Weise, durch die Bewegungsnerven zu den entsprechenden Muskeln geleitet, und auf diese Weise erfolgt sofort die Auslösung, die gewünschte Action. Nun will ich aber auf etwas aufmerksam machen, das, so viel ich weiss, bis jetzt noch keine Beachtung gefunden hat, obgleich solches nach meiner Ansicht von grosser Wichtigkeit ist. Die motorischen Nerven haben mit den, mit Ganglien versehenen sensitiven Nervenwurzeln ein gemeinschaftliches Centrum, das sensorium commune, und es besteht nun die Einrichtung, dass der jeweilige Zustand des Auslösungsapparates für das Allgemeingefühl, oder für das allgemeine Befinden maassgebend ist. Ein behagliches Gesundheitsgefühl beurkundet einen ungestörten Auslösungsapparat, während andererseits jede in letzterem eingetretene Störung sich durch sehr unangenehme Empfindungen kundgiebt. Im Allgemeinen gilt also der Satz, dass richtige physiologische Auslösungen, wenn nämlich solche gewisse Grenzen nicht überschreiten, angenehm empfunden werden, und es beruhen auch auf dieser Thatsache eine Menge von Vergnügungen, z. B. Spaziergehen, Singen, Tanzen, Schwimmen, Schlittschuhlaufen und dergleichen mehr. . . . Nicht nur die inneren physiologischen Auslösungen aber sind eine Quelle von Wohlbehagen und Freude; auch äussere Auslösungen zu bewirken, gewährt dem Menschen Vergnügen. . . . Der

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Mensch ist seiner Natur nach so beschaffen, dass er gern mit Aufwendung geringer Mittel grosse Erfolge erzielt. Das Vergnügen, das man beim Abfeuern von Schusswaffen empfindet, ist hierfür ein sprechender Beleg. . . . Das Rosselenken beim Reiten und Fahren ist hierher ebenfalls zu rechnen u. s. w. Wenn aber auch das Bewirken von Auslösungen eine unerschöpfliche Quelle erlaubter Freuden und harmloser Vergnügungen ist, so muss doch bemerkt werden, dass die Sache leider auch sehr oft zu den verkehrtesten Handlungen und zu strafbaren Verbrechen führt. Attentate haben ohne Zweifel in der Regel ihren Grund in der Sucht, recht eclatante Erfolge zu erzielen, d. h. also möglichst gewaltige Auslösungen zu bewirken; ebenso ist es mit dem Brandstiften und dem schrecklichen Unternehmen, durch auf die Schienen gewälzte Steinblöcke ganzen Bahnzügen den Untergang zu bereiten. Ja, wäre unser Planet so beschaffen, dass es jedem möglich wäre, denselben wie ein mit Dynamit gefülltes Gefäss auseinander zu sprengen, so würden sich sicher zu jeder Zeit Leute finden, bereit, mit Aufopferung ihres eigenen Lebens unsere schöne Erde in den Weltenraum explodiren zu lassen."

Mayer [1]) hatte seine Aufgabe so allgemein als möglich erfasst. Er klärte, reinigte und begrenzte den Begriff der Kraft so weit, dass aus

---

[1]) Julius Robert Mayer ist am 25. November 1814 in Heilbronn geboren, wo sein Vater nach längerem Aufenthalte in der Schweiz und verschiedenen anderen Ländern als Apotheker sich niedergelassen hatte. Ein mehrere Jahre älterer Bruder von Robert übernahm die Apotheke, er selbst studirte von 1832 an Medicin in Tübingen, und dann, nachdem er dieses nicht ohne Zuthun des akademischen Senats verlassen hatte, in München und Wien. Auf den Rath seines Vaters hin, der seinem Sohne die Welt zu erschliessen wünschte, trat Mayer nach seiner ärztlichen Ausbildung in holländische Dienste und ging als Schiffsarzt nach Java. Dort machte ihn im Jahre 1840, seiner eigenen Erzählung nach, die veränderte Farbe des Venenblutes darauf aufmerksam, dass zwischen dem Stoffverbrauch und der producirten Wärme im menschlichen Körper ein directer Zusammenhang bestehen müsse. Im Jahre 1842, in welchem er die Fundamente seiner neuen Kraftanschauung veröffentlichte, schritt er auch zur Gründung eines eigenen Hausstandes. Der hiernach sich schürzende Knoten seiner traurigen Schicksale, die in einer längeren, wie man sagt, nicht ganz freiwilligen Kur in einer Kaltwasserheilanstalt gipfelten, löste sich erst mit dem Ende der fünfziger Jahre, als die nach und nach eintretende Anerkennung der Verdienste Mayer's in der Gelehrtenwelt auch die ihm näher stehenden Kreise von der Gesundheit und der Bedeutung seiner Ansichten überzeugten. Noch im Jahre 1851 erschien von ihm in Vierordt's Archiv eine kleine Arbeit „über die Herzthätigkeit"; danach aber trat eine Pause von über 10 Jahren ein, und erst im Jahre 1862 nahm Mayer seine Untersuchungen mit einer Abhandlung „über das Fieber", die in Wunderlich's Archiv der Heilkunde erschien, wieder auf, doch war während dieser langen Pause sowohl die fundamentale Ausbildung, wie die Verwendung des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft, wie auch die Entwickelung der auf seinen Ideen stehenden Wärmetheorie so weit vorgeschritten, dass er nun die Kraft oder auch die Neigung zu einem weiteren thätigen Verfolg und einem erneuten fundamentalen Eingreifen in dieselbe nicht mehr fand. Alle seine späteren Arbeiten sind mehr populärer Natur oder geben nur skizzenhafte Andeutungen über mögliche

demselben das Gesetz von der Erhaltung der Kraft als ein fundamentales physikalisches Axiom hervorging, das nun, sicher in sich selbst, keines weiteren Beweises bedurfte. Nur zur weiteren Veranschaulichung und Aufweisung des Gesetzes constatirte er dann zuerst die Erhaltung der Kraft bei der Umwandlung der Wärme in Arbeit und besprach später auch alle möglichen, in der Natur vorkommenden Transformationen der Kräfte. Zwar konnte er für diese Untersuchungen, wie das in seinen Verhältnissen lag, keine eigenen Versuche machen und keine eigenen Messungen anstellen, aber er benutzte dafür, was wir ausdrücklich constatiren müssen, die besten vorhandenen Messungen mit grosser Sachkenntniss und grossem Geschick. Danach gelang es ihm auch, als der Erste auf diesem Wege, das Verhältniss von Wärme und mechanischer Kraft in ihren Transformationen quantitativ so genau, als es damals nur möglich war, anzugeben; für die übrigen Kräfte freilich musste er das aus Mangel an geeigneten Vorarbeiten und aus Mangel an geeigneten Maasssystemen unterlassen. Nur qualitativ konnte er zeigen, dass für jede Production von Kraft überall in der Natur auch eine Consumption von Kraft stattfinde, und in dieser Weise hat er auch fast überall die Kräftequellen der Natur selbst da, wo dieselben bei grosser Kraftproduction ganz verborgen erschienen, vollständig und bewusst aufgedeckt.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

---

weitere Verallgemeinerungen oder noch vorhandene Lücken in den Anschauungen über die Erhaltung der Kraft. Im Jahre 1869 hielt er vor der Naturforscherversammlung zu Innsbruck einen Vortrag „über die nothwendigen Consequenzen und Inconsequenzen der mechanischen Wärmetheorie“, worin er darauf aufmerksam machte, dass in der geistigen Welt das Gesetz von der Erhaltung der Kraft nicht in derselben Weise wie für die körperliche gelte, weil die geistigen Thätigkeiten, obgleich sie mit molecularen Vorgängen im Gehirn untrennbar verbunden seien, sich doch keineswegs vollkommen mit denselben deckten, ebenso wenig nämlich, als die telegraphische Depesche eine blosse Function der elektrochemischen Thätigkeit sei, welche den Strom verursache. Im Jahre 1870 sprach Mayer in Neckarsulm „über Erdbeben“; er griff dabei die Theorie Cordier's wieder auf, nach der die Erdbeben durch die Zusammenziehung der Erdkruste und deren Druck auf das Erdinnere entstehen, und vertheidigte diese Theorie auf neue Weise gegen ältere Einwürfe. Ebenfalls noch in demselben Jahre hielt er in Heilbronn einen Vortrag „über die Bedeutung unveränderlicher Grössen“ und drei Jahre später einen solchen „über veränderliche Grössen“. Sein Schwanengesang waren die bedeutenden und weittragenden Arbeiten „über die Torricelli'sche Leere“ und „über Auslösung“ vom Jahre 1876, die wir schon erwähnt. Er starb am 20. März 1878 nach kurzem Krankenlager an einer Lungenentzündung in Heilbronn. Seine innige, überzeugte Religiosität, seine durch alle widrigen Schicksale nicht geminderte, ideale Auffassung des Lebens charakterisiren am besten die Schlussworte eines seiner populären Vorträge vom Jahre 1871: „Man wollte das Nahrungsbedürfniss, wie Sie wissen werden, neuerdings unter der Benennung: „„Der Kampf ums Dasein““ zu einem Princip erheben, und man ist dadurch zu ganz einseitigen Consequenzen gelangt. Ein solcher „„Kampf ums Dasein““ findet allerdings statt. Aber nicht der Hunger ist es, es ist nicht der Krieg, nicht der Hass ist es, was die Welt erhält, — es ist die Liebe.“ — (Mechanik der Wärme, Stuttgart 1874, S. 396.)

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Dass diese Arbeit eine Ergänzung erforderte, dass die Erhaltung der Kraft in allen natürlichen Kräftetransformationen quantitativ sicher im Einzelnen bestimmt werden, dass umgekehrt wie bei Mayer und diesen ergänzend der Beweis für das Gesetz vom Einzelnen ausgehend nach und nach zur Allgemeinheit geführt werden musste, ehe dasselbe als physikalische Grundwahrheit gesichert erscheinen konnte, darüber wird kaum ein Zweifel herrschen, und dass dieser zweite Weg dann den Physikern sicherer und verständlicher als der erstere erschien, kann auch kein Wunder nehmen. Diesen zweiten Weg aber schlug, direct nach Mayer's erster Abhandlung und unabhängig von ihm, wie es sicher erscheint, der englische Physiker **James Prescott Joule** ein. Seine erste hierher gehörige Abhandlung, welche den Titel führt „On the Calorific Effects of Magneto-electricity and the Mechanical Value of Heat", las er am 21. August 1843 vor der Section für mathematische und physikalische Wissenschaften bei der Versammlung der British Association zu Cork [1]).

Joule hatte sich schon längere Zeit mit der Wärmeentwickelung elektrischer Ströme beschäftigt, diese Wärme durch die chemischen Veränderungen, welche in der Batterie vor sich gehen, bestimmt und auch die bei der Elektrolyse des Wassers „latent" werdende Wärme aus den letzteren Ursachen abgeleitet [2]). Als ihm nun die Frage aufstieg, ob die durch magneto-elektrische Ströme im Schliessungsbogen hervorgebrachte Wärme wirklich erzeugt, oder nur von einem Theile des Apparates nach dem anderen übertragen werde, liessen ihn seine erwähnten Untersuchungen zu der zweiten Ansicht neigen, und auch die von Peltier entdeckte Entwickelung von Kälte durch den elektrischen Strom schien für diese Auffassung zu sprechen. Um zwischen den beiden möglichen Ansichten nun zu entscheiden, stellte Joule einen kleinen Elektromagneten in ein Glasgefäss mit Wasser und versetzte dieses fest verschlossene Gefäss zwischen den Polen eines starken, feststehenden Elektromagneten, der mit einer galvanischen Batterie verbunden war, in schnelle Umdrehung. Damit die Intensität der entstehenden inducirten Ströme gemessen werden konnte, gingen die Drahtenden zu einem sehr feinen Galvanometer. Joule bewegte bei den Versuchen seinen rotirenden Elektromagneten mit einer Geschwindigkeit von 600 Umdrehungen in der Minute, und zwar immer abwechselnd eine Viertelstunde mit ge-

---

[1]) Abgedruckt in Philosophical Magazine (3) XXIII, p. 263, 347, 435, 1843; übersetzt von Spengel in „Das mechanische Wärmeäquivalent", Braunschweig 1872, S. 1 bis 40.

[2]) Phil. Mag. (3) XIX, p. 260, 1841: On the Heat evolved by Metallic Conductors of Electricity, and in the Cells of a Battery during Electrolysis. Memoirs of the Lit. and Phil. Soc. of Manchester (2) VII, p. 87, 1846: On the Heat evolved by Electrolysis of Water (gelesen am 24. Jan. 1843); abgedruckt in „Das mechanische Wärmeäquivalent", Braunschweig 1872, S. 41 bis 55.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

schlossenem, und danach eine Viertelstunde mit geöffnetem Stromkreis. Indem er dann die in letzterem Falle meist noch entstehende geringe Wärme von der im ersteren Falle entstehenden abzog, erhielt er die von der inducirten Elektricität wirklich erzeugte Wärmemenge. Eine Zusammenstellung der aus sechs Versuchsreihen erhaltenen mittleren Resultate zu folgender Tabelle

| Nr. der Versuchsreihe | Magneto-elektrische Stromeinheiten | Quadrate von Zahlen proportional der vorigen Spalte | Corrigirte Wärme |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,177 | 0,062 | 0,08 |
| 2 | 0,902 | 1,614 | 1,56 |
| 3 | 0,418 | 0,346 | 0,36 |
| 4 | 1,019 | 2,060 | 2,11 |
| 5 | 0,236 | 0,109 | 0,10 |
| 6 | 0,340 | 0,229 | 0,21 [1]) |

liess ihn dann das folgende, nach ihm benannte Gesetz constatiren: „Dass die durch die Wirkungen der magneto-elektrischen Maschinen entwickelte Wärme (ceteris paribus) proportional ist dem Quadrate der Stromstärke.“

Damit war die Vorstellung einer blossen Uebertragung der Wärme durch den elektrischen Strom unmöglich geworden; überdies bemerkte Joule, dass er die durch Volta'sche Ströme im Stromkreis entwickelte Wärme durch magneto-elektrische Ströme beliebig verstärken oder vermindern konnte, und daraus zog er den allgemeinen Schluss, dass man auch durch mechanische Kräfte Wärme beliebig zerstören oder erzeugen könne, wenn man nur die Magneto-Elektricität als vermittelnde Kraft verwenden wollte.

Mit Hülfe der Joule'schen Maschine war es nun auch sehr leicht, das Verhältniss festzustellen, nach welchem die den Elektromagnet drehende mechanische Kraft in Wärme verwandelt wird. Joule brauchte nur den Elektromagneten, anstatt ihn unmittelbar mit der Hand zu bewegen, durch ein fallendes Gewicht drehen zu lassen, um direct die zur Erzeugung eines bestimmten Wärmequantums nöthige mechanische Arbeit messen zu können. Als mittleres Resultat fand er auf diese Weise: „Die Wärmemenge, welche im Stande ist, 1 Pfd. Wasser um 1° der Fahrenheit'schen Scala zu steigern, ist gleich und kann verwandelt werden in eine mecha-

[1]) Das mechanische Wärmeäquivalent, Braunschweig 1872, S. 14.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

nische Kraft, welche im Stande ist, 838 Pfd. zu einer senkrechten Höhe von einem Fuss zu erheben[1])." Joule knüpft an dieses Resultat nur zwei Folgerungen, dass nämlich die besten Cornish-(Dampf-) Maschinen nur den zehnten Theil der Arbeit leisten, welche die in ihnen verbrannten Kohlen geben könnten, und dass trotzdem die elektro-magnetischen Maschinen, welche von einer der jetzt gebräuchlichen Batterien in Bewegung gesetzt werden, niemals vom ökonomischen Gesichtspunkte aus den Dampf übertreffen können.

In einem vom August 1843 datirten Postscriptum[2]), welches sich an diese vom Juli datirte Arbeit anschliesst, geht er dafür um so weiter und entwickelt in Andeutungen Ideen, die an Kühnheit den Mayer'schen vom Jahre 1845 fast gleichkommen und die in überzeugender Weise für die Unabhängigkeit des Joule'schen Gedankenganges von Mayer's vorhergegangener Arbeit sprechen. Joule erkennt in seinen Arbeiten den sicheren Beweis dafür, dass die beim Bohren von Kanonenröhren entwickelte Wärme, welche Rumford schon zu seiner kinetischen Wärmetheorie geführt hatte, von der Reibung und nicht von einer Verminderung der Wärmecapacität des Metalls herrührt. Er hatte auch, um das zu bekräftigen, einen Stempel, der von einer Anzahl von Löchern durchbohrt war, in einem Gefäss mit Wasser arbeiten lassen und daraus das mechanische Aequivalent zu 770 Fusspfund (423 mkg) berechnet. Er verspricht danach, in dem erwähnten Postscriptum, seine Versuche ohne Zeitverlust zu wiederholen und auszudehnen, da er überzeugt ist, „dass die gewaltigen Naturkräfte durch des Schöpfers „„Werde"" unzerstörbar sind, und dass man immer, wenn man eine mechanische Kraft aufwendet, ein genaues Aequivalent an Wärme erhält". Ebenso betont er, dass die thierische Wärme von den im Körper vor sich gehenden chemischen Veränderungen herrührt, und glaubt, dass bei einer mechanischen Arbeit, dem Drehen einer Maschine oder dem Ersteigen eines Berges, sich eine entsprechende Verminderung der im Körper producirten Wärme ergeben wird. Endlich der weittragendste Gedanke, er behauptet, dass die Kraft der chemischen Verwandtschaft durch den „Zusammensturz der Atome" bestimmt werde. Er berechnet z. B., dass 8 Pfd. Sauerstoff und 1 Pfd. Wasserstoff im gasförmigen Zustande beim Explodiren 60 000 Pfd. Wasser auf 1° F. erwärmen oder 50 000 000 Pfd. 1 Fuss hoch heben können, und meint, dass dieselben Stoffe, im flüssigen Zustande zusammengebracht, weniger Wärme entwickeln müssten, „weil die Atome bei der Verbindung einen geringeren Raum zu durchfallen hätten".

---

[1]) Das ist nach unseren Einheiten 460 mkg. Die einzelnen Resultate wichen freilich von dem mittleren noch sehr stark ab, so sehr, dass das grösste Resultat 1026 Fusspfund, und das kleinste 587 Fusspfund war.

[2]) Das mechanische Wärmeäquivalent, Braunschweig 1872, S. 38.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Joule war also weiter eifrig bemüht, durch die verschiedenartigsten Umwandlungen von mechanischer Kraft in Wärme die Constanz dieses Umwandlungsverhältnisses inductiv nachzuweisen und die Grösse desselben mit grösstmöglichster Genauigkeit zu bestimmen. Zu diesem Zwecke veröffentlichte er im Jahre 1845 eine neue Abhandlung „On the Changes of Temperature produced by the Rarefaction and Condensation of Air“ [1]). Er hatte danach eine Compressionspumpe sammt dem Recipienten in ein Gefäss mit Wasser eingesetzt und dann die bei einer Verdichtung der Luft auf 22 Atmosphären entstehende Wärme gemessen. Die Versuche, die der Vorsichtsmaassregeln (für eine constante Temperatur der eintretenden Luft) und nothwendigen Correctionen (für die Reibung des Pumpenstempels, wie die beim Umrühren des Wassers entstehende Wärme) wegen auch von der technisch-experimentellen Seite sehr interessant sind, ergaben 795 Fusspfund (436 mkg) für das Wärmeäquivalent. Aus der guten Uebereinstimmung dieser mit den früher gefundenen Zahlen schloss Joule abermals, **dass die entwickelte Wärme nichts weiter ist, als eine andere Erscheinungsform der bei der Verdichtung der Luft aufgewandten mechanischen Kraft.**

In dieser Ansicht wurde er durch weitere Versuche nur bestärkt. Er verband zwei gleiche Recipienten durch eine Röhre mit einander und comprimirte in dem einen die Luft auf 22 Atmosphären, während er den anderen luftleer machte. Setzte er dann beide in ein Gefäss mit Wasser und liess die Luft aus dem einen in den anderen ohne jede Hemmung überströmen, so blieb die Temperatur des Wassers unverändert. Brachte er aber beide Recipienten in getrennte Gefässe, so wurden beim Ueberströmen der Luft in dem einen Gefässe 2,36° Kälte, in dem anderen 2,38° Wärme auf jedes Pfund Wasser erzeugt. Zum Behuf genauer Messungen setzte er nur den einen Recipienten mit comprimirter Luft in ein Gefäss mit Wasser und liess die Luft aus demselben durch eine pneumatische Wanne in ein Gefäss ausströmen, in welchem das eingetretene Luftquantum leicht gemessen werden konnte. Das mechanische Aequivalent der Wärme ergab sich dabei aus den verschiedenen Versuchsreihen zu 823, 795, 820, 814 und 760 Fusspfund, wobei das Mittel aus den drei letzten Zahlen oder 798 Fusspfund (438 mkg) als die sicherste Grösse erschien. Ueberdies bestätigten die Versuche Dulong's wichtige Entdeckung, dass, wenn gleiche Volumina elastischer Flüssigkeiten bei gleicher Temperatur und unter gleichem Drucke plötzlich um einen gleichen Bruchtheil ihrer Volumina verdichtet oder ausgedehnt werden, sie eine gleiche absolute Wärmemenge entwickeln oder absorbiren. Den Versuch aber, bei welchem trotz des Ausdehnens der Luftarten auf den doppelten Raum keine Abkühlung

---

[1]) Philosophical Magazine (3) XXVI, p. 369; das mechanische Wärmeäquivalent, Braunschweig 1872, S. 56.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

eintrat, hielt Joule für den sichersten Beweis dafür, dass die Wärme nicht als ein Stoff, sondern als eine Bewegung der constituirenden Theile der Körper angesehen werden müsse. Mit den Ansichten über diese neue Wärmetheorie, auf welche wir später wieder zurückkommen werden, spricht Joule abermals seine feste Ueberzeugung von der absoluten, allgemeinen Gültigkeit des Gesetzes der Erhaltung der Kraft aus. Er ist der Ueberzeugung, dass die Carnot'sche Theorie der mechanischen Arbeitsleistung durch den Wärmestrom der Wahrheit widerspricht, weil sie zu dem Schlusse führt, dass bei unzweckmässiger Einrichtung der Dampfmaschinen lebendige Kraft zerstört werden kann. Joule aber hält dafür, „dass nur der Schöpfer die Macht zu zerstören besitzt", und stimmt „mit Faraday und Rojet darin überein, dass jede Theorie, welche in ihren Consequenzen zur Vernichtung von Kraft gelangt, nothwendigerweise falsch ist" [1]).

Wieder neue Versuche beschrieb Joule in einem Briefe an die Herausgeber des Philosophical Magazine im Jahre 1845 [2]). Er hatte ein Schaufelrad horizontal in einem Gefäss mit Wasser sich bewegen lassen und daraus das mechanische Aequivalent der Wärme zu 890 Fusspfund (489 mkg) berechnet. Aus der Wärme, welche Wasser beim Strömen durch enge Röhren entwickelt, folgte das mechanische Aequivalent der Wärme zu 774 Fusspfund (424 mkg). Joule hielt nun 817 Fusspfund (448 mkg) für die wahrscheinlichst richtige Zahl.

Nachdem dann Joule nochmals in einer kleinen Abhandlung vom Jahre 1847 [3]) Versuche mit dem horizontalen Schaufelrad beschrieben hatte, die im Mittel 781,8 Fusspfund (429 mkg) für das mechanische Wärmeäquivalent ergaben, kam er endlich 1850 zu den exactesten Messungen und damit zur Hauptabhandlung, in der er alle seine bis dahin erreichten Resultate zusammenfasste [4]). Nach einer historischen Einleitung beschreibt er hier fünf Versuchsreihen. Die erste, die bei weitem ausgedehnteste, wurde unternommen mit einem kupfernen, mit Wasser gefüllten, dicht schliessenden Cylinder, in dem sich ein messingnes Schaufelrad drehte. Die zweite und dritte mit einem ähnlichen gusseisernen, mit Quecksilber gefüllten Cylinder, in welchem das Schaufelrad aus Schmiedeisen bestand. Bei beiden Versuchsreihen wurde die Bewegung der Flüssigkeiten selbst so viel als möglich durch Zwischenwände gehemmt, die radial in die Cylinder eingesetzt und so weit, als die Schaufeln erforderten, durchbrochen waren. Bei der vierten und

[1]) Das mechanische Wärmeäquivalent, S. 75.

[2]) Philosophical Magazine (3) XXVII, p. 205 bis 207; das mech. Wärmeäquivalent, S. 77.

[3]) Phil. Mag. (3) XXXI, p. 173; das mech. Wärmeäquivalent, S. 81; Pogg. Ann. LXXIII, 479.

[4]) Phil. Trans. 1850, p. 61; das mech. Wärmeäquivalent, S. 87; Pogg. Ann., Ergänzungsband IV, S. 601.

fünften Versuchsreihe rieb sich in einem gusseisernen, mit Quecksilber gefüllten Kessel eine an der Achse befestigte gusseiserne Scheibe auf einer feststehenden gusseisernen Scheibe. Immer aber wurden der sicheren Bestimmung der aufgewandten mechanischen Kräfte wegen die Bewegungen der Schaufelräder sowohl, als die der rotirenden Scheiben durch fallende Bleigewichte erzeugt. Die Resultate sämmtlicher Versuche, für alle möglichen störenden Einflüsse corrigirt, stellte Joule in der folgenden Tabelle zusammen:

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

| Nr. der Versuchsreihe | Gebrauchtes Material | Aequivalent in der Luft | Aequivalent im Vacuum | Mittel |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Wasser | 773,640 | 772,692 | 772,692 |
| 2 | Quecksilber | 773,762 | 772,814 | 774,083 |
| 3 | Quecksilber | 776,303 | 775,352 | |
| 4 | Gusseisen | 776,997 | 776,045 | 774,987 [1] |
| 5 | Gusseisen | 774,880 | 773,930 | |

Die ganze Abhandlung aber, und damit seine speciellen Untersuchungen über das mechanische Aequivalent der Wärme schloss er mit den Worten: „Es ist höchst wahrscheinlich, dass das Aequivalent aus dem Gusseisen durch die Abreissung kleiner Metalltheilchen während der Reibung, was nicht ohne Aufwand einer gewissen Kraftmenge zur Ueberwindung der Cohäsion geschehen konnte, erhöht worden ist. Aber da diese Menge nicht beträchtlich genug war, um nach Beendigung der Versuche gewogen werden zu können, so fällt der dadurch entstehende Fehler wenig ins Gewicht. Meiner Ansicht nach ist 772,692 das Aequivalent, welches sich aus der Reibung von Wasser ergab, das correcteste, sowohl wegen der Zahl der Versuche, als auch wegen der grossen Wärmecapacität des Apparates. Und da man selbst bei Flüssigkeiten die Erschütterung und die Erzeugung eines leisen Tones nicht völlig vermeiden konnte, so ist wahrscheinlich die obige Zahl noch etwas zu gross. Ich schliesse daher damit, dass ich durch die in dieser Abhandlung mitgetheilten Versuche als bewiesen betrachte: 1) Dass die durch Reibung von Körpern, seien es nun feste oder flüssige, entwickelte Wärmemenge immer proportional ist der aufgewandten Kraft, und 2) dass zur Entwickelung der Wärmemenge, welche im Stande ist, ein Pfund Wasser (im leeren Raume und zwischen 55° und 60° F. gewogen) um 1° F. zu erwärmen, die Aufwendung einer mechanischen Kraft erforderlich ist,

[1]) Das mech. Wärmeäquivalent, S. 118.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

welche repräsentirt wird durch den Fall von 772 Pfd. durch einen Fuss" (424 mkg für 1° C.[1]).

Die Aequivalenz von Wärme und mechanischer Arbeit steht bei Joule's Arbeiten im Vordergrunde; dem Beweis derselben und der genauesten quantitativen Bestimmung dieses Verhältnisses gilt sein eifrigstes Streben. Erst in zweiter Linie kommt die Bewegungstheorie der Wärme, und an letzter Stelle das allgemeine Problem, das Gesetz von der Erhaltung der Kraft, in Betracht. Nicht dass danach Joule über die Gültigkeit des Gesetzes weniger sicher als Mayer gewesen wäre, oder dass er dasselbe weniger allgemein gedacht hätte als dieser; aber Joule als Experimentator hatte weniger Interesse, auf die principielle Seite dieses Gesetzes, seine philosophische Begründung, wie seinen allgemeinen Nachweis in der ganzen Natur einzugehen. Er ist in dieser Beziehung der directeste Gegensatz zu Mayer. Während dieser vor Allem nach der principiellen Möglichkeit des Gesetzes fragt, seinen Beweis für alle Naturerscheinungen deductiv allgemein durchführt und empirische Bestimmungen nur beispielsweise benutzt, soweit es das vorhandene empirische Material zulässt: sucht jener durch neue, sorgfältigste empirische Bestimmungen für die beiden in der Natur am allgemeinsten wirksamen Kräfte, der Wärme und der mechanischen Arbeit,

---

[1]) Joule hat später seine Messungen noch einmal aufgenommen. Das Comité der Britischen Naturforschergesellschaft für die Einführung eines Grundmaasses des elektrischen Widerstandes hatte gewünscht, dass eine neue Bestimmung des mechanischen Aequivalents der Wärme durch Beobachtung der in einem elektrischen Stromkreise entwickelten Wärme gemacht würde, bei welcher Bestimmung aber die von dem Comité vorgeschlagene absolute Widerstandseinheit gebraucht werden sollte. Joule hatte die gewünschten Messungen unternommen und dabei für das mechanische Wärmeäquivalent 782,5 Fusspfund gefunden (Rep. of the Brit. Ass. Dundee 1867, p. 522). Der Differenz dieses Resultats mit den früheren wegen setzte die Versammlung 1870 ein neues besonderes Comité für diese Messungen ein, welches aus W. Thomson, P. G. Tait, Clerk Maxwell, B. Stewart und Joule bestand. Mit den Mitteln, die diesem Comité zur Verfügung standen, nahm dann der letztere seine Messungen wieder auf und bestimmte nach der älteren, directeren Methode das mechanische Wärmeäquivalent auf 772,43 Fusspfund (für die Wärmemenge, welche ein Pfund Wasser im Vacuum gewogen von 60° auf 61° F. zu erwärmen vermag). (Phil. Trans. 1878, p. 365). W. Thomson bemerkt dazu („Heat" by W. Thomson, Edinburgh 1880, p. 35): „Nach Regnault's Messungen der Wärmecapacität des Wassers bei verschiedenen Temperaturen von 0° bis 230° C. muss dieselbe bei 60° F. ungefähr um 0,08 Proc. grösser sein, als bei 32° F. Demgemäss würde Joule's thermodynamisches Resultat für die Arbeit, welche erfordert wird, um 1 Pfd. Wasser von 32° F. auf 33° F. zu erwärmen, 771,81 Fusspfund sein. In Paris ist die Schwere ungefähr 4 Proc. geringer als in Manchester. Für die Mitte von Frankreich und den Süden von Deutschland müsste danach Joule's Resultat auf 423,5 mkg (für die Wärme, welche 1 kg Wasser von 0° C. bis 1° C. in seiner Temperatur zu erhöhen vermag) festgesetzt werden."

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

die Erhaltung der Kraft nachzuweisen und dehnt nur gelegentlich, als gleichsam selbstverständlich, das an einer Stelle sicher nachgewiesene Gesetz auf alle Erscheinungen aus. So arbeiten sich beide, der Naturphilosoph und der Empiriker, unabhängig von einander und doch nicht völlig einseitig, sondern nur der eine mehr die Deduction, der andere mehr die Induction betonend, aber keiner die andere Seite ganz vernachlässigend, zu demselben Ziele hin. Darum aber ist der Streit darüber, wer nun von beiden der eigentliche, der grössere Entdecker gewesen, ein unsinniger und kommt zuletzt weniger auf eine persönliche Schätzung der beiden genialen Männer, als auf eine Vergleichung der beiden physikalischen Methoden, der naturphilosophischen und der experimentellen, hinaus, die, weil sie zwei unvergleichbare, auf ganz verschiedenen Einheiten beruhende Grössen vergleichen will, selbst abgesehen von dem einseitigen Interesse der Beurtheiler, eine nichtige und unzutreffende werden muss[1]).

Es sieht viel mehr nach Schematismus aus, als es in Wirklichkeit ist, und es ist viel weniger willkürlich zurecht gemacht, als in der Natur der Sache selbst begründet, wenn wir sagen, dass ein so principiell einschneidendes, alle Gebiete der Physik beeinflussendes Gesetz, wie das der Erhaltung der Kraft, der Physik als volles Eigenthum erst zugerechnet werden konnte, nachdem alle drei physikalischen Methoden, die Speculation, die Empirie und die Mathematik, in ihrer eigenen Weise den Weg zu der neuen Wahrheit sich gebahnt

[1]) James Prescott Joule wurde am 24. December 1818 in Salford bei Manchester geboren und ist Besitzer einer grossen Brauerei daselbst. Er beschäftigte sich früh mit elektromagnetischen Untersuchungen und Constructionen, die er von dem Jahre 1838 an in Sturgeon's Annals of Electricity beschrieb, und kam dadurch zur Betrachtung des Verhältnisses der die Elektricität erzeugenden Kräfte und der von denselben im Stromkreise zu producirenden Wärme. Seine Messungen des mechanischen Wärmeäquivalents durch Verdünnung und Verdichtung von Gasen führten ihn zur Untersuchung der inneren Arbeit der Gase. Dieselben ergaben bei Luft und den sogenannten permanenten Gasen für die innere Arbeit im Verhältniss zur äusseren allerdings so kleine Werthe, dass man die aus den Zustandsänderungen solcher Gase abgeleiteten Grössen des mechanischen Wärmeäquivalents als genau, und für vollkommene Gase diese innere Arbeit gleich Null setzen konnte. Mit den Abweichungen der Gase von diesem idealen Zustande hat sich dann Joule in Verbindung mit W. Thomson in mehreren, für die Wärmetheorie sehr wichtigen Untersuchungen weiter beschäftigt (Phil. Trans. 1853, p. 357; ibid. 1854, p. 321; ibid. 1862, p. 579). Joule ist überall äusserst sparsam in der Darlegung seiner allgemein theoretischen Auffassungen; für die ursprüngliche Genialität derselben aber geben die Aufnahme, die Anlage und die Ausführung seiner experimentellen Untersuchungen vollgültiges Zeugniss. Jedenfalls wird es richtiger sein, die Einseitigkeit Joule's als Experimentalphysiker mehr seiner Darstellung als seinen Ideen zuzuschreiben.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

hatten. Darum war es nicht bloss nöthig, dass Mayer die Begründung des neuen Gesetzes in unserer Erkenntnisstheorie aufzeigte, dass Joule die Bestätigung in der Erfahrung direct nachwies, es musste auch der Mathematiker der Sache sich bemächtigen und in seiner Weise zur Ableitung des Gesetzes gelangen. Den Grund zu einer solchen mathematischen Betrachtungsweise des Gesetzes, die freilich bis heute noch nicht als abgeschlossen anzusehen ist, legte **H. Helmholtz** im Jahre 1847 mit seiner Abhandlung „Ueber die Erhaltung der Kraft“ [1]).

Wie es in der Natur der Sache liegt, schliesst sich seine Arbeit der Art nach mehr an die Arbeiten Mayer's, als an die von Joule an. Naturphilosophie wie Mathematik gehen als deductive Wissenschaften von allgemeinen Principien aus und versuchen von diesen aus alle Fälle zu umfassen, während der Empiriker den Weg nur zu beginnen, aber für seine Person nicht einmal zu vollenden braucht. Helmholtz beginnt in physiko-mathematisch richtiger Weise mit dem Gesetz der Erhaltung der Kraft als einer nach der Natur unseres Erkenntnissvermögens zulässigen Hypothese, leitet daraus mathematisch die speciellen quantitativen Wirkungsgesetze aller einzelnen Naturerscheinungen ab und sieht dann nach, inwiefern die einzelnen Naturkräfte jenen Gesetzen genügen oder inwiefern die Erfahrungen denselben widersprechen, inwieweit also das fundamentale Princip von der Erfahrung verificirt wird.

Der Grundsatz, dass jede Veränderung in der Natur eine zureichende Ursache haben muss, nöthigt uns, sagt Helmholtz, die unbekannten Ursachen der Vorgänge aus ihren sichtbaren Wirkungen zu suchen. „Die nächsten Ursachen, welche wir den Naturerscheinungen unterlegen, können selbst unveränderlich sein oder veränderlich; im letzteren Falle nöthigt uns derselbe Grundsatz, nach anderen Ursachen wiederum dieser Veränderung zu suchen und so fort, bis wir zuletzt zu letzten Ursachen gekommen sind, welche nach einem unveränderlichen Gesetz wirken, welche folglich zu jeder Zeit unter denselben äusseren Verhält-

---

[1]) Vorgetragen in der Sitzung der physikalischen Gesellschaft zu Berlin am 23. Juli 1847; als selbständige Schrift erschienen bei G. Reimer, Berlin 1847; wieder abgedruckt in „Wissenschaftliche Abhandlungen“ von Helmholtz, I, S. 12 bis 75, Leipzig 1882; zu beachten ist auch das von Helmholtz selbst gegebene Referat in „Die Fortschritte der Physik“, herausgegeben von der Berliner physikalischen Gesellschaft, Bd. III für das Jahr 1847, S. 232 bis 245.

Hermann Ludwig Ferdinand v. Helmholtz ist am 31. August 1821 in Potsdam als Sohn eines Gymnasiallehrers geboren, seit 1838 studirte er Medicin in Berlin, wurde 1842 Assistenzarzt an der Charité, 1843 Militärarzt in Potsdam, 1848 Lehrer der Anatomie an der Kunstakademie in Berlin, 1849 Professor der Physiologie in Königsberg, 1855 in Bonn, 1858 in Heidelberg, 1871 Professor der Physik in Berlin und ist jetzt Director der physikalisch-technischen Reichsanstalt daselbst. Seine in Zeitschriften zerstreuten Arbeiten erschienen gesammelt als „Wissenschaftliche Abhandlungen“, 2 Bde., Leipzig 1882 bis 1883; seine populären Vorträge als „Vorträge und Reden“, Braunschweig 1884, 3. Aufl., 2 Bde.

nissen dieselbe Wirkung hervorbringen. Das endliche Ziel der theoretischen Naturwissenschaften ist also, die letzten unveränderlichen Ursachen der Vorgänge in der Natur aufzufinden." Denken wir uns aber auf diese Weise das Weltall in Elemente mit unveränderlichen Kräften (unveränderlicher Qualität) zerlegt, so „sind die einzigen noch möglichen Aenderungen in einem solchen System räumliche, d. h. Bewegungen, und die äusseren Verhältnisse, durch welche die Wirkungen der Kräfte modificirt werden, können nur noch räumliche sein, also die Kräfte nur Bewegungskräfte, abhängig in ihrer Wirkung nur von den räumlichen Verhältnissen". „Die Kraft aber, welche zwei ganze Massen gegen einander ausüben, muss aufgelöst werden in die Kräfte aller ihrer Theile gegen einander; die Mechanik geht deshalb zurück auf die Kräfte der materiellen Punkte, d. h. der Punkte des mit Materie gefüllten Raumes. Punkte haben aber keine räumliche Beziehung gegen einander als ihre Entfernung, denn die Richtung ihrer Verbindungslinie kann nur im Verhältniss gegen mindestens noch zwei andere Punkte bestimmt werden. Eine Bewegungskraft, welche sie gegen einander ausüben, kann deshalb auch nur Ursache zur Aenderung ihrer Entfernung sein, d. h. eine anziehende oder abstossende. Dies folgt auch sogleich aus dem Satze vom zureichenden Grunde. Die Kräfte, welche zwei Massen auf einander ausüben, müssen nothwendig ihrer Grösse und Richtung nach bestimmt sein, sobald die Lage der Massen vollständig gegeben ist. Durch zwei Punkte ist aber nur eine einzige Richtung vollständig gegeben, nämlich die ihrer Verbindungslinie; folglich müssen die Kräfte, welche sie gegen einander ausüben, nach dieser Linie gerichtet sein, und ihre Intensität kann nur von der Entfernung abhängen. Es bestimmt sich also endlich die Aufgabe der physikalischen Naturwissenschaften dahin, die Naturerscheinungen zurückzuführen auf unveränderliche, anziehende und abstossende Kräfte, deren Intensität von der Entfernung abhängt."

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Die Unveränderlichkeit dieser Kräfte ist, wie sie selbst, nur durch Hypothesiren, nicht direct zu erkennen und kann nur aus ihren Wirkungen erschlossen werden. Diese Wirkungen sind von zweierlei Art. Entweder jene Anziehungs- und Abstossungskräfte vermögen die Elemente, zwischen denen sie wirken, wirklich zu bewegen, und erzeugen also eine gewisse „lebendige Kraft", oder sie erzeugen zwischen den Elementen nur eine gewisse Spannung. Die erzeugte lebendige Kraft eines Elementes wird gemessen durch $mv^2$, oder besser, wie Helmholtz vorschlägt, durch $\frac{1}{2} m v^2$. Die Summe aller Spannkräfte, die auf einer bestimmten Strecke wirken, kann durch den Flächeninhalt der Intensitätscurve dargestellt werden. Diese Curve erhält man dadurch, dass man die in den einzelnen Punkten der Strecke wirksamen Kraftintensitäten als Ordinaten auf der Strecke aufträgt; die Summe der Spannkräfte

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

ist danach gleich $-\int_r^R \varphi\, d\, r$, wo $\varphi$ die Kraftintensitäten in jedem Punkte, $R$ und $r$ aber die Entfernungen des Anfangs- und Endpunktes der Strecke von einem festen Punkte bezeichnen. Für ein System materieller Punkte, die nur der Einwirkung von Kräften unterliegen, in deren Richtungen die Verbindungslinien der Punkte fallen und deren Intensitäten nur von den Entfernungen der Punkte abhängen, erweist dann Helmholtz leicht die Gleichung

$$-\sum\left[\int_{r_{ab}}^{R_{ab}} \varphi_{ab}\, d\, r_{ab}\right] = \sum\left[\frac{1}{2}\, m_a V_a^2\right] - \sum\left[\frac{1}{2}\, m_a v_a^2\right],$$

**und dies ist das Princip von der Erhaltung der Kraft in der** allgemeinsten Form, das in Worten sich folgendermaassen aussprechen lässt: „In allen Fällen der Bewegung freier materieller Punkte unter dem Einfluss ihrer anziehenden und abstossenden Kräfte, deren Intensitäten nur von der Entfernung abhängig sind, ist der Verlust an Quantität der Spannkraft stets gleich dem Gewinn an lebendiger Kraft, und der Gewinn der ersteren dem Verlust der letzteren. Es ist also stets die Summe der vorhandenen lebendigen und Spannkräfte constant."

Helmholtz fasst die Resultate seiner Entwickelungen in die Sätze zusammen: „1) So oft Naturkörper vermöge anziehender oder abstossender Kräfte, welche von der Zeit und Geschwindigkeit unabhängig sind, auf einander einwirken, muss die Summe ihrer lebendigen und Spannkräfte eine constante sein, das Maximum der zu gewinnenden Arbeitsgrösse also ein bestimmtes, endliches. 2) Kommen dagegen in den Naturkörpern auch Kräfte vor, welche von der Zeit und Geschwindigkeit abhängen, oder nach anderen Richtungen wirken, als der Verbindungslinie je zweier wirksamer materieller Punkte, also z. B. rotirende, so würden Zusammenstellungen solcher Körper möglich sein, in denen entweder in das Unendliche Kraft verloren geht, oder gewonnen wird. 3) Beim Gleichgewicht eines Körpersystems unter der Wirkung von Centralkräften müssen sich die inneren und die äusseren Kräfte für sich im Gleichgewicht halten, sobald wir die Körper des Systems unter sich unverrückbar verbunden denken, und nur das ganze System gegen ausser ihm liegende Körper beweglich. Ein festes System solcher Körper wird deshalb nie durch die Wirkung seiner inneren Kräfte in Bewegung gesetzt werden können, sondern nur durch Einwirkung äusserer Kräfte. Gäbe es daher andere als Centralkräfte, so würden sich feste Verbindungen von Naturkörpern herstellen lassen, welche sich

von selbst bewegten, ohne einer Beziehung zu anderen Körpern zu bedürfen."

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Diese allgemeinen Sätze über die Beschaffenheit der Kräfte, die dem Princip von der Erhaltung der Kraft genügen, gehören zu den vielbestrittensten auf dem ganzen Gebiete. Nach der erfahrungsmässig inductiv oder aus den Bedingungen unserer Erkenntniss deductiv gewonnenen Ueberzeugung von der Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile muss das Princip von der Erhaltung der Kraft für alle Naturerscheinungen als gültig angenommen werden [1]). Damit werden durch jene Sätze alle Kräfte, die nicht lebendige oder Centralkräfte sind, in der Natur für unmöglich erklärt. Nun war aber W. Weber noch ein Jahr vor dem Erscheinen der Helmholtz'schen Abhandlung zu dem Resultate gekommen, dass die Kräfte, welche bewegte Elektricitätstheilchen auf einander ausüben, nicht bloss von ihren Entfernungen, sondern auch von ihren Geschwindigkeiten und sogar von ihren Beschleunigungen abhängen [2]). Diese elektro-dynamischen Kräfte würden also nach Helmholtz nicht unter das Gesetz von der Erhaltung der Kraft fallen und Zusammenstellungen erlauben, welche Gewinn oder Verlust an Kraft bis ins Unendliche ergäben. W. Weber zeigte aber gleich darauf [3]), dass auch die von ihm angenommenen Kräfte ein Potential hätten, somit unter allen Umständen ein bestimmtes Arbeitsquantum repräsentirten und danach auch dem Princip von der Erhaltung der Kraft genügten. Wie Weber hat später auch Clausius die Abhängigkeit der elektrodynamischen Kräfte von der Geschwindigkeit angenommen und damit ebenfalls die von Helmholtz gezogenen Grenzen überschritten. Endlich ist J. J. Weyrauch in neuester Zeit zu der Ueberzeugung gelangt, dass auch in der Theorie der Elasticität fester Körper

---

[1]) In der Schrift von 1847 betont Helmholtz nur die Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile, ohne zu untersuchen, wodurch diese Annahme gerechtfertigt wird (Erhaltung der Kraft, S. 7 und 8). In einem Zusatze vom Jahre 1882 aber charakterisirt er jene Unmöglichkeit als eine reine Erfahrungsthatsache: „dass man kein Perpetuum mobile bauen, d. h. Triebkraft ohne Ende nicht ohne entsprechenden Verbrauch gewinnen könne, war eine durch viele vergebliche Versuche, es zu leisten, allmälig gewonnene Induction. Schon längst hatte die französische Akademie das Perpetuum mobile in dieselbe Kategorie wie die Quadratur des Zirkels gestellt und beschlossen, keine angeblichen Lösungen dieses Problems mehr anzunehmen. Das muss doch als der Ausdruck einer unter den Sachverständigen weit verbreiteten Ueberzeugung angesehen werden" (Wissensch. Abhandl. I, S. 73 bis 74). Nach unserer Meinung freilich ist auch eine weit verbreitete Ueberzeugung unter den Physikern noch keine genügende Grundlage für ein Naturgesetz.

[2]) W. Weber, Elektrodynamische Maassbestimmungen: Abhandl. der K. S. Ges. d. Wissensch. zu Leipzig, I, 1846. Siehe den späteren Abschnitt dieses Werkes über Elektricität.

[3]) Pogg. Ann. LXXIII, S. 193, 1848.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

die blosse Annahme von Centralkräften zur Erklärung der Erscheinungen nicht genügt. Er benennt solche Kräfte, die zwischen zwei Massentheilchen wirksam sind, mit ihrer Richtung in die Verbindungslinie dieser Theilchen fallen, aber nicht mehr von der Entfernung der Theilchen allein, sondern von der Bewegung derselben abhängen, mit dem Namen Stabkräfte. Die Discussion solcher Kräfte führt ihn dann zu dem Satze, dass auch für sie das Princip von der Erhaltung der Energie noch gültig ist, falls nur die Arbeit der wirksamen Kräfte in einem bestimmten Zeitmoment, wenn auch nicht mehr durch ein vollständiges Differential einer reinen Coordinatenfunction, so doch überhaupt noch durch ein vollständiges Differential dargestellt wird, d. h. wenn $Sdl$ (wo $S$ die wirkenden Stabkräfte, $l$ die Entfernung der Massentheilchen) ein vollständiges Differential einer beliebigen Function ist [1]). Helmholtz aber bemerkte in den Zusätzen zu seiner Abhandlung ausdrücklich, dass sein Beweis für das Princip von der Erhaltung der Kraft, der dasselbe auf Centralkräfte beschränkte, zu eng, und dass danach der zweite von den oben abgedruckten Sätzen zu weit gefasst sei. Seine Worte über diesen Satz lauten [2]): „Auch dieser Satz ist zu weit gefasst, da wir die vorausgehenden allgemeinen Sätze auf die Fälle beschränken müssen, wo Gleichheit der Action und Reaction gilt. Wenn wir die letztere fallen lassen, so zeigt das neuerdings von Herrn Clausius aufgestellte elektrodynamische Grundgesetz einen Fall, wo Kräfte, die von den Geschwindigkeiten und Beschleunigungen abhängen, doch nicht ins Unendliche Triebkraft erzeugen können."

Nach den allgemeinen Discussionen des Princips von der Erhaltung der Kraft geht Helmholtz zu den speciellen Anwendungen und damit zur Verificirung des Gesetzes im Einzelnen über. Anerkannt und gebraucht wurde dasselbe schon seit langer Zeit in allen Problemen der Mechanik, bei welchen nicht Reibung oder Stoss unelastischer Körper in Betracht kamen. So oft aber mechanische Bewegungen durch Stoss oder Reibung, oder so oft Wärme- und Lichtstrahlen durch Absorption vernichtet werden, entsteht eine Temperatursteigerung, zuweilen eine elektrische Spannung, bei der Lichtabsorption auch wohl Phosphorescenz oder chemische Wirkung [3]). Lassen wir die letzteren

---

1) Jacob J. Weyrauch (Professor am Polytechnicum in Stuttgart): Theorie elastischer Körper, Leipzig 1884, S. 132 und 180; Das Princip von der Erhaltung der Energie, Leipzig 1885, S. 13 u. 31.

2) Helmholtz: Wissensch. Abhandl. I, S. 70 u. 71, Leipzig 1882.

3) Bei der Zurückwerfung, Brechung, Polarisation und Interferenz des Lichtes wird keine lebendige Kraft vernichtet, sondern sie wird nur anders vertheilt. Vernichtet wird die lebendige Kraft der elastischen Wellen erst bei denjenigen Vorgängen, welche wir als Absorption bezeichnen. Die Absorption der Schallwellen dürfen wir wohl hauptsächlich für einen Uebergang der Bewegung an die getroffenen Körper und Vernichtung in diesen durch Reibung halten. Die Absorption der Wärmestrahlen wird von einer proportionalen

Erscheinungen bei Seite, weil da noch zu Vieles im Dunkeln liegt, so fragt es sich, auf welche Weise die entwickelte Wärme als Aequivalent der verloren gegangenen Kraft betrachtet werden kann. Wäre die Wärme ein Stoff, so könnte ein Kraftäquivalent nur in der Arbeit bestehen, welche die Wärme bei ihrem Uebergange aus einer höheren in eine niedere Temperatur leistet; in diesem Sinne haben Carnot und Clapeyron die Aufgabe bearbeitet und alle Folgerungen einer solchen Aequivalenz wenigstens für Gase und Dämpfe bestätigt gefunden. Die materielle Theorie der Wärme ist aber nicht haltbar; es folgt aus den Versuchen über die Reibungswärme sowohl, wie aus denen über die Erzeugung und Vernichtung von Wärme durch den elektrischen Strom nothwendig, dass die Wärme kein Stoff, sondern eine Bewegung sei. Quantität der freien Wärme würde uns danach die Quantität der lebendigen Kraft dieser Bewegung sein, und Quantität der sogenannten latenten Wärme die Quantität derjenigen Molecularspannkraft, welche bei Aenderung der Constitution der Körper Wärmebewegungen hervorbringen kann. „Für den factischen Nachweis, dass einer bestimmten Quantität mechanischer Kraft immer eine Quantität Wärme entspricht, existiren bisher nur die noch unvollkommenen Versuche von Joule“ [1]), doch stimmen auch Untersuchungen und Berechnungen Holtzmann's mit dem Gesetz überein. Bei der Erzeugung von Wärme durch chemische Action würde das Gesetz von der Erhaltung der Kraft zusammenfallen mit dem von Hess (Pogg. Ann. L, S. 392 und LVI, S. 598) aufgestellten Gesetz, dass bei einer chemischen Verbindung mehrerer Stoffe zu gleichen Producten stets gleich viel Wärme hervorgebracht wird, in welcher Ordnung und in welchen Zwischenstufen auch die Verbindung vor sich gehen möge.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Am fruchtbarsten zeigt sich das Princip für die Lehren von der Elektricität und dem Magnetismus. Sind $m_1$ und $m_2$ zwei elektrische oder magnetische Massenelemente, so ist die Intensität ihrer Anziehung $\varphi = -\frac{m_1 m_2}{r^2}$, und der Gewinn an lebendiger Kraft, wenn ihre Entfernung von $\infty$ bis $r$ abnimmt, ihr elektrischer oder mag-

Wärmeentwickelung begleitet. Bei der Absorption des Lichtes kennen wir dreierlei Vorgänge. Zuerst nehmen die phosphorescirenden Körper das Licht in solcher Weise in sich auf, dass sie es nachher als Licht wieder ausstrahlen. Zweitens scheinen die meisten, vielleicht alle Lichtstrahlen Wärme zu erregen. Drittens erzeugt das absorbirte Licht in vielen Fällen chemische Wirkungen. (Erhaltung der Kraft, S. 23 bis 25.)

[1]) Der Satz stammt aus Helmholtz' eigenem Referat über seine Arbeit. Die ähnlichen Sätze in dieser selbst (S. 27) begleitet er 1881 mit der Anmerkung: „Dieses Urtheil bezieht sich nur auf die allerersten, damals bekannt gewordenen Versuche Joule's. Die späteren, mit vollendeter Sachkenntniss und eiserner Energie durchgeführten Versuche verdienen die höchste Bewunderung.“ (Wissensch. Abhandl. von Helmholtz, Leipzig 1882, I, S. 33.)

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

netischer Zustand sonst aber ungeändert bleibt, ist gleich $\int_r^\infty \varphi\, dr = -\frac{m_1 m_2}{r}$. Gebrauchen wir mit Gauss für die Grösse $-\frac{m_1 m_2}{r}$ den Namen Potential, so ist die Zunahme an lebendiger Kraft bei irgend einer Bewegung dem Ueberschuss des Potentials am Ende des Weges über das Potential am Anfange desselben gleich zu setzen. Aendert sich auch der elektrische Zustand der Theilchen, so müssen wir noch die Potentiale der beiden Körper auf sich selbst berücksichtigen. Bezeichnen wir diese Potentiale respective mit $W_1$ und $W_2$, und das Potential der Körper auf einander mit $V$, so lässt sich beweisen, dass der Gewinn an lebendiger Kraft der Aenderung der Summe $V + \frac{1}{2}(W_1 + W_2)$ gleich sein muss.

Bezeichnet man ferner die freie Spannung einer auf einem Leiter vorhandenen Quantität $Q$ von positiver Elektricität mit $C_1$, und die einer gleichen Quantität negativer Elektricität auf einem anderen Leiter mit $-C_2$, so ist die Quantität der Spannkräfte, welche durch das Elektrisiren der Leiter erzeugt worden ist, gleich $Q\left(\frac{C_1 - C_2}{2}\right)$, wenn als Maass der freien Spannung diejenige gebraucht wird, die durch die Einheit der Elektricität auf einer Kugel vom Radius 1 entsteht. Bei der Entladung der Elektricitäten wird diese Spannkraft vernichtet und dadurch Wärme im Schliessungsdraht erzeugt, diese Wärme muss $\Theta = \frac{1}{2a} Q (C_1 - C_2)$ sein, wo $a$ das mechanische Aequivalent der Wärme bezeichnet. Bezieht man dieses Gesetz auf eine Leydener Flasche, deren äussere Belegung nicht isolirt, deren Ableitungsgrösse vielmehr als $S$ anzunehmen, so ist $C_2 = 0$ und $Q = CS$, und somit $\Theta = \frac{1}{2a} QC$ oder $\Theta = \frac{1}{2a} \frac{Q^2}{S}$. Diese Schlüsse werden bewahrheitet durch die Messungen von Riess (Pogg. Ann. XLIII, S. 47), der die entwickelte Wärme proportional dem Quotienten $\frac{Q^2}{S}$ [1]) gefunden, wie durch die Versuche von Vorsselmann de Heer (Pogg. Ann. XLVIII, S. 292) und Knochenhauer (Pogg. Ann. LXII, S. 364 und LXIV, S. 64), welche diese als unabhängig vom Schliessungsbogen constatirt hatten.

Der Volta'sche Begriff der Contactelektricität widerspricht dem Princip von der Erhaltung der Kraft, so lange

[1]) Riess bezeichnet mit $S$ allerdings die Oberfläche der Belegung der Flasche, aber bei gleichmässig construirten Flaschen ist diese Oberfläche jedenfalls der Ableitungsgrösse proportional.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

nicht die Nothwendigkeit der chemischen Processe mit in denselben aufgenommen wird. Geschieht dies aber, nehmen wir an, dass die Leiter zweiter Classe der galvanischen Spannungsreihe eben deshalb nicht folgen, weil sie nur durch Elektrolyse leiten, so lässt sich der Begriff der Contactkraft sogleich wesentlich vereinfachen und auf anziehende und abstossende Kräfte zurückführen. Es lassen sich nämlich offenbar alle Erscheinungen in Leitern erster Classe herleiten aus der Annahme, dass die verschiedenen chemischen Stoffe verschiedene Anziehungskräfte gegen die beiden Elektricitäten haben, und dass diese Anziehungskräfte nur in unmessbar kleinen Entfernungen wirken, während die Elektricitäten auf einander dies auch in grösseren thun. Die Contactkraft würde danach in der Differenz der Anziehungskräfte bestehen, welche die der Berührungsstelle zunächst liegenden Metalltheilchen auf die Elektricitäten dieser Stelle ausüben, und das elektrische Gleichgewicht eintreten, wenn ein elektrisches Theilchen, welches von dem einen zum anderen übergeht, nichts mehr an lebendiger Kraft verliert oder gewinnt.

Bei den galvanischen Strömen haben wir in Bezug auf die Erhaltung der Kraft hauptsächlich folgende Wirkungen zu betrachten: Wärmeentwickelung, chemische Processe und Polarisation. Bei den Ketten ohne Polarisation müssen, wenn das Princip von der Erhaltung der Kraft gelten soll, die elektromotorischen Kräfte zweier combinirbarer Metalle dem Unterschiede der bei ihrer Verbrennung zu entwickelnden Wärme proportional, es müssen also in zwei Ketten, in welchen die chemischen Processe gleich sind, auch die elektromotorischen Kräfte gleich sein, womit einige Messungen Poggendorff's (Pogg. Ann. LIV, S. 429 und LVII, S. 104) gut übereinstimmen. Die Ketten mit Polarisation muss man in solche theilen, die nur Polarisation und keine chemische Zersetzung, und solche, die beides hervorbringen. Die Ströme der letzteren kann man in zwei zerlegt denken, in den inconstanten oder Polarisationsstrom und den constanten oder Zersetzungsstrom. Auf den letzteren ist dieselbe Betrachtungsweise anwendbar, wie für die constanten Ströme ohne Gasentwickelung. Die durch die Polarisirung verlorene Kraft des ursprünglichen Stromes aber müsste man als secundären Strom wiedergewinnen können. Bei den thermoelektrischen Strömen kann die Erhaltung der Kraft nur stattfinden, wenn die durch den Strom nach dem Gesetz von Lenz in der ganzen Leitung, und die nach den Versuchen von Peltier in der kälteren Löthstelle entwickelte Wärme gleich ist der in der wärmeren Löthstelle verschluckten; aus diesen Annahmen wird dann das Gesetz der elektrothermischen Wirkungen abgeleitet, für die aber bis jetzt noch keine verificirenden Versuche bekannt sind.

Da die magnetischen Erscheinungen, wie die elektrischen durch die Annahme zweier Fluida erklärt werden, die sich im umge-

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

kehrt quadratischen Verhältniss der Entfernung abstossen, „so folgt hieraus allein schon nach der im Anfang unserer Abhandlung gegebenen Herleitung, dass die Erhaltung der Kraft bei der Bewegung magnetischer Körper gegen einander (wie bei der Bewegung elektrischer Körper) stattfinden müsse". Im Einzelnen wird, ähnlich wie bei der Elektricität, gezeigt, dass der Gewinn an lebendiger Kraft bei der Bewegung magnetischer Körper, deren Vertheilung sich ändert, gemessen wird durch die Veränderung der Summe $V + \frac{1}{2}(W_a + W_b)$. Bewegt sich ein Magnet unter dem Einflusse eines Stromes, so muss die lebendige Kraft, die er dabei gewinnt, geliefert werden aus den Spannkräften, welche in dem Strome verbraucht werden. „Diese sind während des Zeittheilchens $dt$ nach der schon oben gebrauchten Bezeichnungsweise $AJdt$ in Wärmeeinheiten, oder $aAJdt$ in mechanischen, wenn $a$ das mechanische Aequivalent der Wärmeeinheit ist. Die in der Strombahn erzeugte lebendige Kraft ist $aJ^2Wdt$, die vom Magneten gewonnene $JdV/dt$, wo $V$ sein Potential gegen den von der Stromeinheit durchlaufenen Leiter ist. Also:

$$aAJdt = aJ^2Wdt + J\frac{dV}{dt}dt,$$

folglich:

$$J = \frac{A - \frac{1}{a}\frac{dV}{dt}}{W}$$

Wir können die Grösse $(1/a) \cdot (dV/dt)$ als eine neue elektromotorische Kraft bezeichnen, als die des Inductionsstromes. Sie wirkt stets der entgegen, welche den Magneten in der Richtung, die er hat, bewegen oder seine Geschwindigkeit vermehren würde. Da diese Kraft unabhängig ist von der Intensität des Stromes, muss sie auch dieselbe bleiben, wenn vor der Bewegung des Magneten gar kein Strom vorhanden war." Das Inductionsgesetz lässt sich danach so aussprechen: „Die gesammte elektromotorische Kraft des Inductionsstromes, den eine Lagenänderung eines Magneten gegen einen geschlossenen Stromleiter hervorbringt, ist gleich der Veränderung, die dabei in dem Potentiale des Magneten gegen den Leiter vor sich geht, wenn letzterer von dem Strome $-1/a$ durchflossen gedacht wird. Einheit der elektromotorischen Kraft ist dabei die, durch welche die willkürliche Stromeinheit in der Widerstandseinheit hervorgebracht wird. Letztere aber diejenige, in welcher jene Stromeinheit in der Zeiteinheit die Wärmeeinheit entwickelt. Dasselbe Gesetz findet sich bei Neumann, nur hat er statt $1/a$ die unbestimmte Constante $\varepsilon$." Helmholtz führt das Gesetz für alle Fälle der Induction durch, ausgenommen für solche, wo die Induction bedingt ist durch einen Wechsel in der Stromstärke, für welche Fälle sich nichts schliessen

lässt, weil die Form der Ansteigung der elektrischen Ströme noch nicht bekannt ist.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Nachdem Helmholtz endlich noch auf die chemischen Strahlen des Sonnenlichtes als einzige Kraftquelle im Pflanzen- und Thierreiche ganz kurz hingewiesen, nachdem er Matteucci's Behauptung [1]), dass Zink bei seiner Auflösung in Schwefelsäure gleichviel Wärme erzeuge, ob es nun unmittelbar oder mit Platin zu einem galvanischen Element zusammengestellt sich löse, gebührend zurückgewiesen, kommt er zu dem bemerkenswerthen Schlusssatze: „Ich glaube durch das Angeführte bewiesen zu haben, dass das besprochene Gesetz keiner der bisher bekannten Thatsachen der Naturwissenschaften widerspricht, von einer grossen Zahl derselben aber in einer auffallenden Weise bestätigt wird. Ich habe mich bemüht, die Folgerungen möglichst vollständig aufzustellen, welche aus der Combination desselben mit den bisher bekannten Gesetzen der Naturerscheinungen sich ergeben, und welche ihre Bestätigung durch das Experiment noch erwarten müssen. Der Zweck dieser Untersuchung, der mich zugleich wegen der hypothetischen Theile derselben entschuldigen mag, war, den Physikern in möglichster Vollständigkeit die theoretische, praktische und heuristische Wichtigkeit dieses Gesetzes darzulegen, dessen vollständige Bestätigung wohl als eine der Hauptaufgaben der nächsten Zukunft der Physik betrachtet werden muss."

Das Gesetz von der Erhaltung der Kraft fand seine sicherste Begründung nicht durch die Arbeit eines Einzelnen oder die Arbeiten Einzelner, sondern durch die Entwicklung der gesammten Wissenschaft, die seit dem Anfange des Jahrhunderts immer deutlicher auf die endliche Constatirung dieses Gesetzes hindrängte. Doch musste das Gesetz erst officiell proclamirt und technisch in Worten und Formeln fixirt werden, ehe dasselbe von der ganzen wissenschaftlichen Welt wirklich erkannt und noch mehr anerkannt wurde. Unbestreitbar der Erste, vielleicht auch der Originellste bei dieser Proclamation war Mayer, der mit seiner Umgestaltung des Kraftbegriffs dem Gesetz erst den Boden bereitete. Fast gleichzeitig und unabhängig von ihm, aber doch nach ihm, bewies Joule durch die genauesten Messungen die Constanz der Kraft in den Transformationen von mechanischer Arbeit und Wärme. Unabhängig auch von Mayer, aber wohl bekannt mit den ersten Arbeiten von Joule, unterzog sich Helmholtz dann noch einmal der Ausdehnung des Gesetzes auf das ganze Gebiet der Physik, nun aber nicht wieder philosophisch, wie Mayer, sondern mathematisch verfahrend. Zwischen diesen drei Männern nun, und noch anderen, die ebenfalls

---

[1]) Archives des scienc. phys. et nat. IV, p. 375, 1847.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

nicht geringe Verdienste um die Festsetzung, wie um die Verwerthung des Gesetzes haben, einen sicheren Entscheid treffen und, wie bei einer technischen Erfindung, dem einen allein das Patent der Erfindung zusprechen wollen, das heisst, nach meiner Ueberzeugung, den Charakter und das Werden einer neuen Anschauung, welche nur durch eine gänzliche Umgestaltung der wissenschaftlichen Ansichten zu erwerben war, gänzlich verkennen.

Deutlich geht das auch aus der weiteren Geschichte des Gesetzes hervor. Eine schnelle Annahme und eine richtige Würdigung der Arbeiten von Mayer und Helmholtz wurde vor Allem durch zwei Umstände verhindert. Der eine Theil der Physiker legte überhaupt wenig Werth auf allgemeine Speculationen über die Kräfte, sah in den speciellen experimentellen Untersuchungen der einzelnen physikalischen Potenzen allein das Heil, fürchtete in der Behauptung der Identität aller Kräfte und der Möglichkeit einer allseitigen Transformation derselben nur eine neue Auflage der alten verabscheuten Naturphilosophie zu erleben und meinte von den neuen Ideen jedenfalls eine schädliche Ablenkung der Arbeiten von der als fruchtbar erkannten empirischen Methode erwarten zu müssen. Der andere Theil der Physiker aber betrachtete im Gegentheil das Gesetz von der Erhaltung der Kraft als ein längst anerkanntes Ideal der Physik, dem man sich nach und nach immer mehr annähern werde, dem man aber durch jene allgemeinen Speculationen auch nicht näher gekommen sei.

Von beiden Seiten her hatte man keine Veranlassung, jene Arbeiten besonders zu beachten, vielmehr genügenden Grund, dieselben mit gänzlichem Schweigen zu decken. Mayer's erste Abhandlungen wurden darum überall übergangen, und weder in akademischen Zeitschriften wurde über dieselben referirt, noch wurden sie in anderen Werken besprochen. Helmholtz aber sagt über die Aufnahme seiner Abhandlung selbst sehr charakteristisch: „Ich war nachher einigermaassen erstaunt über den Widerstand, dem ich in den Kreisen der Sachverständigen begegnete; die Aufnahme meiner Arbeit in Poggendorff's Annalen wurde mir verweigert, und unter den Mitgliedern der Berliner Akademie war es nur C. G. J. Jacobi, der Mathematiker, der sich meiner annahm. Ruhm und äussere Förderung war in jenen Zeiten mit der neuen Ueberzeugung noch nicht zu gewinnen, eher das Gegentheil[1].“ Besser lag die Sache für die Arbeiten von Joule. Gegen diese konnten weder die einen Physiker tendenziöse Bedenken erheben, noch konnten die anderen die thatsächliche Wichtigkeit derselben verkennen. Joule's Arbeiten mussten darum, im Anfange wenigstens, als das eigentliche Fundament des Fortschrittes er-

[1]) Wissensch. Abhandl., Leipzig 1882, I, S. 74.

scheinen. Die Constanz des Umwandlungsverhältnisses von Wärme und mechanischer Arbeit, die schon längst im Princip ausgesprochen, war hier auf sicherem experimentalem Wege nachgewiesen. Dem gegenüber blieb nur übrig, sich selbst die Frucht der eigenen Ideen zu sichern und das unleugbar fruchtbare Gebiet selbst durch eigene Arbeit weiter nutzbar zu machen. Sowie aber die Physiker specieller mit den Joule'schen Arbeiten sich beschäftigten, so wurden sie auch zu einer besseren Würdigung der allgemeineren Anschauungen von Mayer und Helmholtz hingeführt, und bald danach zeigte sich der Umschwung der Dinge in vielfachen Streitigkeiten über die Priorität der sonst so wenig geschätzten Entdeckung.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Holtzmann berechnete schon im Jahre 1845 in seinem Werke „Ueber die Wärme und Elasticität der Gase und Dämpfe" (Mannheim 1845) [1]) das mechanische Aequivalent, auf ähnliche Weise wie Mayer und mit ziemlich demselben Resultate [2]), aus dem Verhältniss der specifischen Wärme der Luft bei constantem Druck und bei constantem Volumen, behielt aber dabei die Carnot'schen Vorstellungen über die Wirksamkeit des Wärmestoffes durch sein Gefälle bei [3]). Séguin aîné veröffentlichte im Jahre 1847 eine Note à l'appui de l'opinion émise par Mr. Joule sur l'identité du mouvement et du calorique [4]), worin er darauf aufmerksam machte, dass er schon in der Schrift Études sur l'influence des chemins de fer (Paris 1839) zwischen der in der Dampfmaschine consumirten Wärme und der producirten Bewegung eine natürliche Identität, einen gemeinsamen Ursprung constatirt habe. Er erzählt dann weiter, wie schon vor langer Zeit sein Onkel Montgolfier ihn auf diesen Gedanken gebracht und wie er nur noch gehofft habe, diesen Ideen durch sichere Experimente und gut constatirte Thatsachen feste Beweise hinzuzufügen. Jedenfalls sei er nun auf ganz anderem Wege als Joule zu fast denselben Resultaten gelangt. Er habe nämlich aus der Abkühlung, die der Wasserdampf bei seiner Ausdehnung erleidet, das Verhältniss der aufgewandten Kraft zur verbrauchten Wärme berechnet und habe so das mechanische Aequi-

---

[1]) Auszug in Pogg. Ann., Ergzbd. II, S. 183.

[2]) Holtzmann gab 374 mkg, während Mayer 367 mkg gefunden hatte.

[3]) In einer nachgelassenen Abhandlung „Mechanische Wärmetheorie", Stuttgart 1866, erkennt Holtzmann die Priorität Mayer's willig an und giebt auch einer Erinnerung von Clausius gegenüber (Pogg. Ann. LXXXIX, S. 658) den Fehler in seiner Anschauung vom Wesen der Wärme zu. Dagegen betont er, dass ihm Mayer's Arbeiten bei Abfassung seiner Schrift nicht bekannt gewesen und dass gerade die letztere, die recht schnell bekannt geworden, wesentlich zur Anerkennung eines mechanischen Aequivalents der Wärme beigetragen. (Mech. Wärmetheorie, S. 8 bis 9.) Carl Holtzmann, 23. Oct. 1811 — 25. April 1865, Prof. d. Physik am Polytechnicum in Stuttgart.

[4]) Compt. rend. XXV, p. 420, 1847. Marc Séguin, 1786 bis 1875, französischer Eisenbahntechniker.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

valent der Wärmeeinheit im Mittel, ähnlich wie Joule, zu 449 mkg gefunden.

Auch Colding[1]) hatte noch vor 1843 versucht, das Gesetz von der Erhaltung der Kraft allgemein philosophisch einzuführen und wenigstens für die Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit experimentell zu begründen. Nach seiner eigenen Erzählung[2]) ging er dabei folgendermaassen vorwärts. Da die Kräfte geistige und immaterielle Wesen sind, welche uns nur durch ihre Herrschaft über die Natur bekannt werden, so müssen sie ohne Zweifel Wesen sein, viel höher als jedes andere materiell existirende, und da evident die Kräfte allein die Weisheit ausdrücken, welche wir in der Natur bemerken und bewundern, so müssen diese Gewalten auch in Verbindung stehen mit der geistigen, immateriellen und intellectuellen Macht selbst, welche allen Fortschritt in der Natur leitet. Wenn dem aber so ist, so lässt sich auch unmöglich begreifen, dass diese Kräfte irgend welche sterbliche, vergängliche Wesen sein sollten, und folglich müssen sie ohne Zweifel als absolut unvergänglich betrachtet werden[3]). Auf mechanischem Gebiete ist die Unveränderlichkeit der Kraft schon constatirt durch das „berühmte und fruchtbare Gesetz von D'Alembert über die lebendigen und die verlorenen Kräfte". Colding meinte dasselbe auf alle Transformationen der mechanischen Arbeit, der chemischen wie der anderen Kräfte ausdehnen zu dürfen und hatte die Absicht, diese Ideen im Jahre 1840 auf der Naturforscherversammlung in Kopenhagen vorzutragen. Auf den Rath mehrerer Gelehrten, vor allen Oersted's, aber gab er diesen Plan auf und beschloss erst für seine Ideen noch genügendere experimentelle Beweise zu suchen. Als solche schon vorhandene betrachtete er die Messungen Dulong's über die Compressionswärme und Verdünnungskälte der Luftarten, die Bemerkung Oersted's über die bei der Compression von Flüssigkeiten entstandene Wärme und endlich auch die Beobachtungen von Berthollet und Lagerhjelm über die Erwärmung der festen Körper durch Druck. Nun aber führte ihn die Erinnerung an die Messungen der Reibungswärme durch Rumford, Haldat, Morosi u. A. zu einer directen Bestimmung des Zusammenhanges von Wärme und mechanischer Arbeit. Er construirte einen schlittenähnlichen Appa-

[1]) Ludwig August Colding, geboren am 13. Juli 1815 auf Seeland, Ingenieur in Kopenhagen.

[2]) Lettre aux Rédacteurs du Philosophical Magazine sur l'histoire du principe de la conservation de l'énergie p. M. A. Colding. Aus dem Phil. Mag. (4) XXVII, p. 56 — 64, von M. Verdet übersetzt in Ann. de chim. et de phys. (4) I, p. 466 — 477, 1864.

[3]) Das ist ganz der alte philosophische Schluss von der Unveränderlichkeit des Schöpfers auf die Unveränderlichkeit der in der Natur wirkenden Kräfte.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz c. 1840 bis c. 1850.

rat, welcher ihm erlaubte, die Mengen der Wärme zu bestimmen, die unter verschiedenen Belastungen und bei verschiedenen Geschwindigkeiten durch die Reibung von Messing auf sich selbst, oder auf Zink, auf Blei, auf Eisen, auf Holz und endlich auf Tuch erzeugt werden. Das Resultat von ungefähr 200 Messungen ergab dann nicht bloss, dass das Verhältniss zwischen mechanischer Arbeit und producirter Wärme überall dasselbe, sondern auch, dass die absolute Grösse dieses Verhältnisses, auf die betreffenden Einheiten bezogen, 350 zu 1 sei [1]).

Diese Resultate theilte Colding in einer ersten Arbeit über diesen Punkt 1843 der Königlichen Gesellschaft in Kopenhagen unter dem Titel „Nogle Saetninger om Kraefterne“ mit, bezeichnete aber diese Abhandlung ausdrücklich als eine vorläufige; wie er auch das Gesetz von der Erhaltung der Kraft erst nur als wahrscheinlich, nicht als sicheres Naturgesetz hinstellte. Er empfing danach von der Gesellschaft die Mittel, einen vollkommeneren Apparat zu construiren; die Resultate der damit angestellten neuen Versuche und Messungen legte er 1847 der Gesellschaft der Naturforscher in Kopenhagen und später der Königlichen Gesellschaft vor, welch letztere sie in ihren Abhandlungen theils 1848, theils 1850 abdruckte. Im Jahre 1851 theilte er eine neue Arbeit mit, in welcher er die Theorie der Dampfmaschine ganz aus den neuen Gesichtspunkten bearbeitet hatte. Endlich erschien im Jahre 1856 in den Schriften der Königlichen Gesellschaft noch eine Abhandlung Colding's unter dem Titel „Physikalische Untersuchungen über das allgemeine Verhältniss, welches zwischen den intellectuellen und den Naturkräften existirt“, in welcher er nun das ganze Gebiet der Naturphilosophie nach dem neuen Gesetz überarbeitete und in welchem er insofern über Mayer hinausging, als er auch die geistigen Kräfte mit in den Geltungsbereich des Gesetzes von der Erhaltung der Energie hineinziehen und aus der Unzerstörbarkeit der Naturkräfte direct auf die Unendlichkeit des intellectuellen menschlichen Lebens schliessen wollte.

---

[1]) Colding bemerkt hierbei, das sei ungefähr dasselbe Verhältniss, welches Mayer 1842 gegeben habe, „ohne es zu beweisen“. Verdet weist in einer Anmerkung diese letzten Worte sehr ernst zurück: „Si l'on voulait critiquer avec la même rigueur les premiers travaux relatifs à la théorie mécanique de la chaleur, il ne serait pas impossible de réduire à bien peu de chose les titres de M. Colding et de M. Joule. . . . M. Joule ayant trouvé, pour le rapport du travail dépensé à la chaleur dégagée dans une machine magnetoélectrique, des nombres qui varient de 321 à 571, on pourrait soutenir qu'il aurait dû en conclure qu'il n'y avait pas de rapport constant entre les deux quantités. L'injustice de pareilles conclusions est sans doutes évidente; mais celle des critiques adressées de divers côtés à Mayer ne l'est guerre moins à nos yeux (Ann. de chim. et de phys. (4) I, p. 470 — 471, 1864).

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Colding's Arbeiten wurden erst später gegen Mayer hervorgehoben, vor der Hand blieben die ersteren ebenso so unbeachtet, wie die letzteren. Um so mehr Ursache aber hatte Mayer der steigenden Anerkennung gegenüber, welche die Joule'schen Experimente erfuhren, seine Ansprüche auf die Priorität schleunigst geltend zu machen. In den Comptes rendus von 1847 [1]) hatte Joule von seinen Untersuchungen über das mechanische Aequivalent der Wärme Nachricht gegeben, ohne Mayer's Namen auch nur zu nennen. Im nächsten Jahre berichtete darum Mayer [2]) über sein erstes Ahnen des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft in Surabaya im Jahre 1840, über seine erste Bestimmung des mechanischen Aequivalents der Wärme in der Abhandlung von 1842 und dann über seine umfassenden Auslassungen in der Schrift von 1845, wobei er nun seinerseits Joule nicht erwähnte. Daraufhin sah sich Joule [3]) dann zu einer Kritik der Mayer'schen Arbeiten veranlasst, die nicht sehr tief auf dieselben einging und die er wohl besser unterlassen hätte. Er erzählt darin zuerst den Entwickelungsgang seiner Entdeckung und versichert, dass er bei seinen Arbeiten von Mayer's Schrift aus dem Jahre 1842 absolut keine Kenntniss gehabt habe. Dann behauptet er, erst durch seine Messungen sei constatirt worden, dass die specifische Wärme eines Gases bei allen Veränderungen in der Dichte desselben constant bleibe, während man nach allen vorhergehenden Versuchen, vor Allem nach denen von Marcet und de la Rive, vielmehr das Gegentheil hätte vermuthen sollen. Unter diesem Umstande aber hätte Mayer auch nicht schliessen dürfen, dass die ganze, bei der Ausdehnung eines Gases verbrauchte Wärme äquivalent wäre der dabei geleisteten äusseren Arbeit, und damit werde auch dessen ganze Bestimmung des mechanischen Aequivalents der Wärme hinfällig. Joule weist ausserdem auf die Verdienste Rumford's, Davy's und auch Séguin's um die mechanische Wärmetheorie hin und kommt zuletzt zu dem Schluss: „Danach wird Jedermann den Scharfsinn Mayer's anerkennen, der die numerischen Relationen voraussagte, welche zwischen der Wärme und der Kraft statuirt werden müssen, aber man kann, wie ich glaube, nicht leugnen, dass ich der erste gewesen bin, welcher die Existenz des mechanischen Aequivalents der Wärme bewiesen und ihren numerischen Werth durch unbestreitbare Experimente festgestellt hat."

Mayer wies diese Auslassungen so leicht und so sicher als nur möglich zurück [4]). Joule, sagt er, würde Recht haben, wenn nicht Gay-Lussac schon im Jahre 1807 (Mém. d'Arc. I, p. 180)

[1]) Compt. rend. XXV, p. 309—311, 1847.

[2]) Ibid. XXVII, p. 385—387, 1848.

[3]) Ibid. XXVIII, p. 132—135, 1848.

[4]) Ibid. XXIX, p. 534—535, 1849.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

bewiesen hätte, dass die Gase ohne jeden Verbrauch von äusserer Arbeit und Wärme sich ausdehnen können. Er giebt dann genau die Stelle aus seiner Arbeit von 1845 an, wo er dieses Experiment wirklich für sich angeführt [1]), und schliesst mit dem würdigen, wohlthuend berührenden Satze: „Im Uebrigen bin ich überzeugt, dass Herr Joule seine Entdeckungen über die Wärme und die Kraft gemacht hat, ohne die meinigen zu kennen, und ich gestehe, dass die zahlreichen Verdienste dieses berühmten Physikers mir grosse Achtung einflössen, aber nichtsdestoweniger glaube ich in meinem Rechte zu sein, wenn ich wiederhole, dass ich zuerst (im Jahre 1842) das Gesetz von der Aequivalenz der Wärme und der lebendigen Kraft mit seinem numerischen Ausdruck veröffentlicht habe.“ Joule hat jedenfalls, als er jene Aeusserung that, wie die meisten Gegner Mayer's, nur die erste, vorläufige Abhandlung desselben vom Jahre 1842 gekannt, leider bricht die Reihe der betreffenden Artikel in den Comptes rendus mit dem obigen Aufsatze Mayer's ab, und Joule hat nicht die Gelegenheit benutzt, seinen offenbaren Irrthum, der auf einer ungenügenden Kenntniss der Mayer'schen Arbeiten beruhte, zu berichtigen [2]).

War es Mayer durch jene Artikel gelungen, die Aufmerksamkeit so weit auf seine Arbeiten zu lenken, dass nun deutsche und französische Physiker wenigstens seinen Namen meist in Verbindung mit den neuen Ideen über die Kraft nannten, so verhinderte ihn die immer mehr fortschreitende Trübung seiner persönlichen Verhältnisse fast ein volles

---

[1]) „Die organische Bewegung etc.“ in „Mechanik der Wärme“, S. 11: „Gay-Lussac hat durch das Experiment bewiesen, dass eine elastische Flüssigkeit, die aus einem Ballon in einen gleich grossen luftleeren Behälter strömt, im ersten Gefäss genau um so viel Grade sich abkühlt, als sie im zweiten sich erwärmt.“ Siehe auch S. 337 d. Bds.

[2]) In der historischen Einleitung zu seiner Hauptabhandlung vom Jahre 1850 citirt Joule wieder nur Mayer's Arbeit von 1842 mit den Worten, die den Kernpunkt gar nicht berühren: „Die erste Erwähnung von Versuchen, in denen die Entwickelung von Wärme durch Reibung von Flüssigkeiten festgestellt wurde, geschah meines Wissens durch Herrn Mayer, welcher behauptet, durch Schütteln die Temperatur des Wassers von $12^0$ auf $13^0$ gesteigert zu haben, ohne jedoch die Grösse der verbrauchten Kraft oder die zum Zwecke eines genauen Resultats angewandten Vorsichtsmaassregeln anzugeben.“ (Mechanisches Wärmeäquivalent, Braunschweig 1872, S. 91.) Im nächsten Jahre drückt er sich wenigstens über die Hypothese, dass die durch die Comprimirung von Luft erzeugte Wärme ein vollständiges Aequivalent der verbrauchten Arbeit sei, etwas sachlicher aus: „Später fand ich, dass Mayer schon vor mir eine ähnliche Hypothese vertreten hatte, ohne jedoch eine experimentale Darlegung ihrer Richtigkeit zu versuchen.“ (Mech. Wärmeäquivalent, S. 122.) Trotz der ganz klaren und sicheren Berichtigung Mayer's hat aber Tait später den von Joule erhobenen Vorwurf in ziemlich unveränderter Form noch einmal wiederholt. (Ueber einige Fortschritte etc., Braunschweig 1877, S. 46.)

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Jahrzehnt lang, für die Verbreitung seiner Anschauungen weiter persönlich thätig zu sein [1]). Eine Wendung zum Besseren in Mayer's traurigem Geschick trat danach erst Anfang der sechziger Jahre, und zwar nicht zum geringsten Theile, wie man freudig anerkennen muss, durch einen englischen Physiker, John Tyndall, ein. Clausius, der bei dieser Wendung der Dinge mit betheiligt war, erzählt die Sache folgendermaassen [2]): „Die Arbeiten von Rob. Mayer waren bis zum Anfange der sechziger Jahre sehr wenig bekannt. Nur die erste derselben, ein kurzer Aufsatz, welcher noch gewisse Mängel der Auffassung enthielt, war im Jahre 1842 in einer wissenschaftlichen Zeitschrift erschienen und dadurch in weiteren Kreisen verbreitet; die anderen dagegen waren als besondere Brochüren gedruckt und waren, da zur Zeit ihres Erscheinens wenige Personen sich für den Gegenstand interessirten, in Vergessenheit gerathen. Auch ich kannte zu jener Zeit nur die erste Arbeit, und daher kam es, dass ich, wie Tyndall in dem gleich zu erwähnenden Vortrage mit-

---

[1]) Helmholtz, der noch in den „Fortschritten der Physik" für das Jahr 1847 Mayer's Schrift nur der Vollständigkeit wegen angeführt, sagt in den „Fortschritten der Physik" für das Jahr 1849 (Berlin 1852, V, S. 241 bis 242): „Die Behauptung der Unzerstörbarkeit der Arbeitsgrösse der mechanischen Kräfte und der Aequivalenz der Aeusserungen der verschiedenen Naturkräfte mit bestimmten Grössen mechanischer Arbeit hat Mayer zuerst ausgesprochen im Jahre 1842." In dem Referat für die Jahre 1850 bis 1851 spricht er von der „von Mayer zuerst aufgestellten, später von Joule und dem Berichterstatter selbst" aufgenommenen Hypothese, und fortan nennt er Mayer unter den Begründern der mechanischen Wärmetheorie immer an erster Stelle. V. Regnault erkennt 1853 (Compt. rend. XXXVI, Pogg. Ann. LXXXIX, S. 339) Mayer's Verdienste um die mechanische Wärmetheorie an: „Die Herren Joule, Thomson und Rankine in England, Mayer und Clausius in Deutschland haben . . . den Calcul der mechanischen Wärmetheorie entwickelt und gesucht, daraus die Gesetze aller die Gase betreffenden Erscheinungen abzuleiten. Meinerseits habe ich seit langer Zeit in meinen Vorlesungen ähnliche Ideen ausgesprochen." Whewell dagegen hat noch 1857 in der 3. Aufl. seiner sonst unparteiischen History of the inductive sciences (II, p. 487, Additions to the III. Edition) über das mechanische Wärmeäquivalent nur den Satz: „The fundation of this theory is conceived to have been laid by Mr. Joule of Manchester, in 1844; and it has since been prosecuted by him and by Prof. Thomson of Glasgow, by experimental investigations of various kinds." Poggendorff aber gab gar in der betreffenden Lieferung seines „Biographisch-literarischen Handwörterbuches" (Bd. II, S. 94) bei dem Namen J. R. Mayer an: „Soll vor 1858 im Irrenhause gestorben sein (Augsb. Allgem. Zeitung)"; eine Stelle, die im Nachtrag (II, S. 1428), anscheinend auf Mayer's eigene Veranlassung, folgendermaassen verbessert wurde: „Ist nicht 1858 im Irrenhause gestorben, sondern (1862) noch am Leben."

[2]) Die mechanische Behandlung der Elektricität, S. 325 bis 326, Braunschweig 1879. John Tyndall, geboren am 21. August 1820 in London, studirte Physik in Marburg und Berlin, seit 1853 Prof. d. Physik an der Royal Institution in London.

getheilt hat, auf eine von ihm im Jahre 1862 an mich gerichtete Anfrage über den Inhalt der Mayer'schen Schriften antwortete, ich glaube nicht, dass er sehr Erhebliches darin finden werde, wolle indessen versuchen, sie ihm zu verschaffen. Als ich dann aber die Brochüren von dem Buchhändler in Heilbronn erhalten hatte und sie, bevor ich sie an Tyndall schickte, selber las, erkannte ich, dass ich mich geirrt hatte, und dass Mayer vielmehr die Mängel, welche anfangs seinen mechanischen Vorstellungen noch angehaftet hatten und welche bei einem praktischen Arzte, der zum ersten Male über einen mechanischen Gegenstand schrieb, sehr erklärlich waren, durch weitere, eingehende Studien beseitigt hatte, und in diesen Schriften seine Ansichten mit Klarheit und Schärfe auseinandersetzte, und einen Ideenreichthum entwickelte, welchen man bewundern musste, selbst wenn man nicht mit Allem dort Gesagten übereinstimmte [1]). Ich nahm daher, als ich Tyndall die Schriften zusandte, meinen früheren Ausspruch zurück und hob dasjenige, was ich in den Schriften für besonders wichtig hielt, hervor. Gerade damals hatte Tyndall bei Gelegenheit der im Jahre 1862 stattfindenden Londoner Industrieausstellung einen öffentlichen Vortrag in der Royal Institution vor einer grossen und gewählten, aus verschiedenen Ländern zusammengekommenen Zuhörerschaft zu halten. Dazu wählte er als Gegenstand die Mayer'schen Schriften und setzte die Hauptresultate derselben in seiner bekannten ansprechenden Weise auseinander, und als er dadurch das grösste Interesse erweckt hatte, und man natürlich gespannt darauf war, zu erfahren, von wem das Alles stamme, da nannte er den Mann, welcher in einer kleinen deutschen Stadt, ohne wissenschaftliche Anregung und ohne Ermuthigung seine mit Genialität erfassten Gedanken mit wunderbarer Kraft und Ausdauer entwickelt habe."

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

---

[1]) Es war für Mayer von entscheidender Wichtigkeit, dass auf seine späteren Arbeiten, die der Abhandlung von 1842 folgten, aufmerksam gemacht wurde; die falsche Schätzung seiner Verdienste rührte in den meisten Fällen davon her, dass man immer nur auf jene erste Arbeit recurrirte. Für die letzteren Thatsachen geben auch die folgenden, übrigens für Mayer noch nicht ungünstigen Worte W. Thomson's vom Jahre 1851 Zeugniss: „The first published statement of this principle (of the equivalence between mechanical work and heat) appears to be in Mayer's „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur" which contains some correct views regarding the mutual convertibility of heat and mechanical effect, along with a false analogy between the approach of a weight to the earth and a diminution of the volume of a continuous substance, on which an attempt is founded to find numerically the mechanical equivalent of a given quantity of heat. In a paper published about fourteen months later. . . . Mr. Joule of Manchester expresses very distinctly the consequences regarding the mutual convertibility of heat and mechanical effect . . . and investigates on unquestionable principles the absolute numerical relations according to which heat is connected with mechanical power." (Edinb. Trans. XX, p. 262, 1853, gelesen am 17. März 1851.)

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Leider sollte diese unerschrockene Edelthat Tyndall's ihm selbst Unannehmlichkeiten bereiten. „Bald nach dem Vortrage erschien in einer viel gelesenen, nicht wissenschaftlichen, englischen Zeitschrift „„Good Words““ ein von Thomson und Tait überschriebener Artikel „„Energy““, dessen eigentlicher Verfasser aber der Letztere war, wie aus einer später von ihm gemachten Bemerkung hervorgeht. Hierin heisst es, nachdem der erste Aufsatz von Mayer erwähnt ist: „„On the strength of this publication an attempt has been made to claim for Mayer the credit of being the first to establish in its generality the principle of the Conservation of Energy. It is true that „La science n'a pas de patrie“, and it is highly creditable to British philosophers, that they have so liberally acted according to this maxim. But it is not to be imagined that on this account there should be no scientific patriotism, or that in our desire to do all justice to a foreigner, we should depreciate or suppress the claims of our own countrymen. And it especially startles us that the recent attempts to place Mayer in a position which he never claimed, and which had long before taken by another, should have found support within the very walls wherein Davy propounded his transcendent discoveries.““

Auf diesen von Clausius erwähnten Artikel hin entspann sich dann eine lange, stellenweise sehr gereizte Polemik zwischen Tyndall und P. G. Tait (Professor der Physik in Edinburg), die hauptsächlich in den Philosophical Magazine (XXV, XXVI und XXVIII, 1863 und 1864) geführt wurde und die Letzterer dann noch in einer Brochüre Sketch of Thermodynamics (1868), und in einer grösseren Schrift Lectures on some Recent Advances in Physical Science (London 1876, übersetzt ins Deutsche, Braunschweig 1877) fortsetzte. Diesen Schriften müssen wir im Interesse der historischen Gerechtigkeit noch einige Bemerkungen widmen. Tait hatte vorläufig eine beschränkte Anzahl Abdrücke seiner ersteren Schrift Sketch of Thermodynamics machen lassen und dieselben zur Begutachtung an urtheilsfähige Personen, darunter auch Helmholtz und Clausius, versandt. Helmholtz antwortete darauf deutlich abweisend: „Was nun Robert Mayer betrifft, so kann ich den Standpunkt begreifen, den Sie ihm gegenüber eingenommen haben, kann aber doch diese Gelegenheit nicht hingehen lassen, ohne auszusprechen, dass ich nicht ganz derselben Meinung bin. . . . Obgleich also Niemand leugnen wird, dass Joule viel mehr gethan hat als Mayer, und in den ersten Abhandlungen des Letzteren viele Einzelheiten unklar sind, so glaube ich doch, man muss Mayer als einen Mann betrachten, der unabhängig und selbständig diesen Gedanken gefunden hat, der den grössten, neueren Fortschritt der Naturwissenschaften bedingte: und sein Verdienst wird dadurch nicht geringer, dass gleichzeitig ein Anderer in einem anderen Lande und anderem Wirkungskreise dieselbe Entdeckung gemacht und sie freilich

nachher besser durchgeführt hat als er [1]).“ Schärfer lautet der Brief von Clausius: „Gestatten Sie mir noch zum Schlusse, Ihnen . . . offen zu sagen, dass meiner Ueberzeugung nach die Schrift in ihrer jetzigen Form Ihrem eigenen so hoch stehenden wissenschaftlichen Rufe nur schaden kann. Jeder Leser sieht auf den ersten Blick, dass dieses nicht eine unparteiische historische Darstellung der Sache ist, wie man sie von einem Forscher Ihres Ranges erwarten muss, sondern eine blosse Parteischrift, welche nur zum Lobe einiger weniger Personen geschrieben ist. Ich selbst schätze diese Personen sehr hoch, glaube aber doch, dass man um ihretwillen nicht Andere herabsetzen muss [2]).“ Trotzdem aber erschien jene Schrift in der Hauptsache unverändert, und in dem folgenden Werke von 1876 drückt sich Tait über Mayer mit noch grösserer Schärfe und einer Einseitigkeit aus, wie sie bedauerlicher nicht sein könnte. „Es ist also an der Zeit“, sagt Tait, „dass Mayer, obwohl unsere Mittel, über den Gegenstand zu urtheilen, noch unvollkommen sind, doch, soweit es möglich ist, auf den ihm gebührenden Platz gestellt werde. Er ist unverständig gepriesen worden und war ein unglücklicher Mann, daher wird sich natürlich ein Schrei der Entrüstung gegen Jeden erheben, der sich der nothwendigen Aufgabe unterzieht, seine wirklichen Verdienste zu bezeichnen. Aber in der Geschichte der Wissenschaft giebt es kein argumentum ad misericordiam. Der Tadel, wenn davon in einer solchen Sache die Rede ist, trifft die, welche ihm fälschlich etwas zuschreiben, was er durchaus nicht geleistet hat [3]).“ „Geschaffen und experimentell bewiesen ist das Gesetz der Erhaltung der Energie in seiner Allgemeinheit unzweifelhaft von Colding in Kopenhagen und Joule in Manchester [4]).“

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Tait betont für die Aufstellung des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft als erstes Moment immer die Constatirung der Aequivalenz von Wärme und Arbeit, und da Mayer hierfür keine eigenen Experimente aufzuweisen, sondern nur die Experimente anderer Physiker benutzt hat, so meint Tait nun Mayer's Verdienste auf diesem Gebiete ganz eliminiren zu können. Die Nothwendigkeit einer vorherigen

---

[1]) Helmholtz, wissensch. Abhandl. I, S. 72 und 73.

[2]) Clausius, die mechanische Behandlung der Elektricität, Braunschweig 1879, S. 329.

[3]) Vorlesungen über einige Fortschritte etc., Braunschweig 1877, S. 48.

[4]) Ibid. S. 49. Anerkennen muss man, dass Colding selbst den ihm hier zugewiesenen Platz vor Mayer nicht beansprucht hat. Er schreibt ohne jede Einrede (Ann. de chim. et de phys. (4) I, p. 467): „Je puis supposer que vous savez que M. Verdet et M. Helmholtz jugeant d'après les parties de mes recherches qui leur sont connues, estiment qu'il convient de placer mon nom immédiatement après celui de M. Mayer dans l'histoire de la découverte du nouveau principe.“

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Untersuchung, Reinigung und Umwandlung unseres Begriffes der Kraft übersieht er gänzlich und hält eigentlich das ganze Gesetz schon durch die allseitig erfahrungsmässig anerkannte Thatsache der Unmöglichkeit eines perpetuum mobile für genügend begründet [1]). Einestheils aber beruht das doch auf einer Verkennung des erkenntnisstheoretischen Ursprunges des Gesetzes als eines Fundamentes der ganzen Physik, und anderentheils zeugt es von einer historischen Unkenntniss der factischen Anschauungen vom Begriff des perpetuum mobile, wie er unter den Physikern der damaligen Zeit herrschte. In Betreff eines perpetuum mobile, für das man nur mechanische Potenzen benutzte, darf man allerdings den erfahrungsmässigen Beweis schon zu jener Zeit für erbracht ansehen, dass man aber trotzdem das perpetuum mobile für möglich hielt, geht wohl unwiderleglich aus den folgenden Worten des angesehenen Physikers Muncke hervor, die sich in dem durchaus sicher gehenden Wörterbuch der Physik von Gehler [2]) finden, und die wir schon einmal theilweise citirt haben: „Reden wir zuerst vom perpetuum mobile physicae, so unterliegt es keinem Zweifel, dass es ein solches geben könne, da der Kreislauf der Dinge in der Natur ein stets fortdauernder, ununterbrochen sich erneuernder ist. Vermag man daher irgend eine solche, in der Natur vorhandene Kraft zur Bewegung einer Vorrichtung zu benutzen, so ist damit die Aufgabe gelöst. Verschiedene Mechanismen dieser Art sind in der Wirklichkeit gegeben, die man in dieser speciellen Beziehung oft nicht hinlänglich beachtet. So ist unter Anderem unser Planetensystem ein wahres perpetuum mobile, nicht minder die sich um ihre Achse drehende Erde, ein Fluss, welcher durch den unausgesetzten Wechsel der Verdunstung und des Niederschlages ununterbrochen fliesst, ein Barometer, dessen Schwankungen wegen nie fehlender Luftströmungen ohne Unterlass stattfinden, die täglich oscillirenden Magnetnadeln, alle diese und unzählige andere Apparate bewegen sich unverkennbar beständig, aber die bewegende Kraft oder Ursache ist durch die Natur selbst gegeben und sie gehören insgesammt unter diejenige Classe von Vorrichtungen, die man mit dem gemeinschaftlichen Namen eines perpetuum mobile physicae benennen kann. . . . Die hierauf gestellte Ansicht, nebst den darauf gegründeten Bestimmungen, scheint mir so einfach und klar, dass ich es für überflüssig halte, noch etwas Weiteres hinzuzufügen. Ganz anders verhält es

---

[1]) Vorlesungen über einige Fortschritte etc., Braunschweig 1877, S. 59. Dass auch Joule mit dieser Begründung nicht einverstanden, könnte man aus manchen Stellen seiner Abhandlungen schliessen, wie z. B. aus der folgenden: „Da ich der Ansicht bin, dass nur der Schöpfer die Macht zu zerstören besitzt, so stimme ich mit Rojet und Faraday darin überein, dass jede Theorie, welche in ihren Consequenzen zur Vernichtung von Kraft gelangt, nothwendig falsch ist.“ (Das mechanische Wärmeäquivalent, S. 75.)

[2]) 2. Aufl., VII, S. 410 bis 411, 1833.

sich dagegen mit dem perpetuum mobile mechanicae, welches meistens verstanden wird, wenn von der Möglichkeit seiner Darstellung die Rede ist.“ Nach diesen im Jahre 1833 geschriebenen Worten eines vielgerühmten und als Autorität geachteten Physikers, denen bis zum Jahre 1842 jedenfalls keine thatsächliche Widerlegung wurde, wäre es aber um unsere ganze heutige Physik, der das Gesetz von der Erhaltung der Kraft als hauptsächliche Grundlage dient, doch recht schlecht bestellt, wenn dieses Gesetz nur auf der erfahrungsmässigen Unmöglichkeit eines perpetuum mobile im allgemeinsten Sinne ruhen sollte. Vielmehr zeigen sie sicher, dass die Unmöglichkeit des perpetuum mobile nicht ein Erfahrungssatz ist, aus dem man das Gesetz von der Erhaltung der Kraft folgern kann, sondern dass umgekehrt die aus einem richtig geläuterten Begriff der Kraft folgende Unmöglichkeit einer Schaffung wie einer Vernichtung derselben erst die Idee der Unmöglichkeit des perpetuum mobile gesichert und zur allgemeinen Anerkennung gebracht hat.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Inwieweit bei Tait die einseitige Betonung der experimentellen Methode und die gänzliche Negirung des Werthes der Deduction in der Physik auf einer tieferen philosophischen Untersuchung der wissenschaftlichen Methode beruht, können wir hier nicht feststellen. Jedenfalls zeigt Tait einen nationalen Patriotismus auch auf wissenschaftlichem Gebiete, eine Vorliebe im Hervorheben der Verdienste seiner Landsleute und eine Leichtigkeit im Vorbeigehen an den Erfolgen Anderer, welche eine objective Beurtheilung der historischen Entwickelung und des historischen Rechtes seinerseits ungemein erschweren. Aus den vielen Stellen seines Werkes, die dafür zeugen, dass er solche Schwierigkeiten nicht immer siegreich überwunden, will ich nur zwei anführen. Nach Tait ist nicht Galilei, sondern der Engländer Gilbert der Begründer der neueren Physik, Galilei kommt erst später, und in gleicher Linie mit dem Engländer Newton in Betracht [1]). Ebenso ist zwar der Däne Colding als Mitentdecker des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft gegenüber dem deutschen Mayer ins Feld zu führen. Aber Colding ist nach seinem eigenen Geständniss erst durch das d'Alembert'sche Princip auf die Idee seiner Entdeckung gekommen, und nach Tait ist dieses Princip nichts weiter als ein besonderer Fall des Newton'schen Satzes von der Gleichheit der Wirkung und Gegenwirkung.

---

[1]) Vorlesungen über einige Fortschritte etc., Braunschweig 1877, S. 10 bis 11: „Der Schöpfer der wahren experimentellen Wissenschaft scheint Gilbert aus Colchester gewesen zu sein, dessen mit Recht berühmte Abhandlung De Magnete vor 300 Jahren veröffentlicht wurde. Nach ihm kamen Galilei und Newton, die beide riesengrosse Schritte in der wahren Richtung machten, und durch sie wurde der Weg, auf dem man allein zur Entdeckung physikalischer Gesetze gelangen kann, für alle Zeiten festgelegt.“

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

„Sie sehen also", so plaidirt Tait[1]) wörtlich für seinen Landsmann Newton, der das doch eigentlich nicht nöthig hat, „dass Colding in Wirklichkeit durch Newton's Werk auf seinen Gedanken gebracht wurde."

Nachträglich hat Tait ausser Colding noch einen zweiten Gelehrten entdeckt, der ihm noch mehr als jener geeignet erscheint, alle Rechte Mayer's zu vernichten. „Erst nach dem Erscheinen dieses Werkes (im April 1876), so berichtet er[2]), wurde meine Aufmerksamkeit auf eine Abhandlung von Mohr gelenkt, welche fast Alles zu Gunsten der ersten Arbeit von Mayer Gesagte hinfällig macht. . . . Mohr's Schrift enthält fast Alles, was in Mayer's Abhandlung richtig ist, in einer weit vollendeteren Form. . . . Gerade das Verfahren (das mechanische Aequivalent der Wärme aus der specifischen Wärme der Luft bei constantem Druck einerseits und bei constantem Volumen andererseits zu berechnen), für welches Mayer von Vielen so ausserordentlich gefeiert wird — obgleich dasselbe im Princip, wenn auch nicht in der Praxis, durchaus irrig ist —, findet sich bei Mohr weit klarer dargelegt, als es fünf Jahre darauf von Mayer geschah." Indessen sind diese Sätze in ihrer Genesis noch schwerer verständlich als Alles, was wir vorher von Tait erwähnt haben. Es ist richtig, Mohr stellt in jener Abhandlung vom Jahre 1837 eine reine Bewegungstheorie der Wärme auf, die in manchen Punkten den späteren kinetischen Theorien der Wärme vorgreift, er giebt eine Definition der Gase, die in ihrem Fundamente mit der späteren mechanischen Gastheorie ziemlich zusammenfällt[3]), er spricht auch endlich das Princip von der Einheit aller Naturkräfte und ihrer vollkommen gegenseitigen Umwandlung in einander mit vollkommener Sicherheit aus[4]). Aber von dem, was in der ersten

---

[1]) Vorlesungen über einige Fortschritte etc., Braunschweig 1877, S. 50.

[2]) Ibid., Vorrede zur zweiten Aufl., S. IX. Die betreffende Abhandlung Friedr. Mohr's „über die Natur der Wärme", die Tait übrigens falsch, als in Liebig's Annalen von 1837 erschienen, citirt, hatte merkwürdige Schicksale. Mohr schickte sie 1837 an Poggendorff, der ihr aber die Aufnahme in seine Annalen verweigerte, „weil keine neue Experimentaluntersuchungen darin enthalten wären". Als er dieselbe danach nach Wien an v. Baumgärtner sandte und darauf gar keine Antwort bekam, hielt er die Abhandlung für verloren. Erst in den sechziger Jahren wurde er darauf aufmerksam gemacht, dass dieselbe in v. Baumgärtner und v. Holger's Zeitschrift für Physik (V, S. 419, 1837) doch gedruckt worden sei. Nachdem er mit Mühe ein Exemplar von dieser längst eingegangenen und selten gewordenen Zeitschrift aufgetrieben, liess er dann dieselbe in einer kleineren Schrift „Allgemeine Theorie der Bewegung und Kraft" (Braunschweig 1869) noch einmal (S. 84 bis 106) unverändert abdrucken.

[3]) „Ein gasförmiger Körper ist ein solcher, bei welchem die Vibration so erweitert ist, dass die Theile gar nicht mehr innerhalb dieser Anziehungsgrenze kommen und sich nur abstossen." (Allgem. Theor. der Bewegung und der Kraft, S. 90.)

[4]) „Ausser den bekannten 54 chemischen Elementen giebt es in der Natur der Dinge nur noch ein Agens, und dieses heisst Kraft; es kann unter passen-

Mayer'schen Arbeit über die Constanz der Naturkräfte Neues gehandelt wird, und was doch das eigentliche Wesen der neuen Anschauungen von den Kräften ausmacht, findet sich in Mohr's Abhandlung nichts. Mohr gebraucht das Wort Kraft noch ganz in dem Sinne einer elementaren Eigenschaft der Materie, von einer Ersetzung dieser Bedeutung durch die andere einer begrenzten Arbeitsfähigkeit, deren Nothwendigkeit Mayer so klar hervorhebt, ist bei Mohr nicht die Rede. Mohr's Sätze beziehen sich alle auf die Verwandlung der Kraftformen; auf die Kraftquantitäten oder gar auf die Erhaltung derselben bei aller Transformation geht er gar nicht ein. Das Verfahren, aus der Compressionswärme der Luft das mechanische Aequivalent der Wärme zu berechnen, muss Tait in Mohr's Schrift hineingelesen haben, denn herauszulesen ist es für Jemand, der dasselbe nicht bereits kennt, gewiss nicht. Mohr selbst ist auch weit entfernt, sich als einen Rivalen von Mayer zu fühlen, er erkennt vielmehr dessen Verdienst bei der Aufstellung des mechanischen Aequivalents der Wärme neidlos an und nimmt für sich nur die Stelle eines der ersten Anhänger der Bewegungstheorie der Wärme und der Anschauung von der Einheit der Naturkräfte mit vollem Recht, wie seine Abhandlung zeigt, in Anspruch [1]). So hat Tait hier zum zweiten Male das Unglück, einen Mann als Rivalen von Mayer im Kampfe gegen denselben benutzen zu wollen, der schon vorher in der strittigen Sache Mayer den Vortritt ausdrücklich zugestanden hatte.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

Leider besitzen wir auch im Deutschen eine Schrift, die in fast noch grösserer Einseitigkeit und Ungenauigkeit als die von Tait nicht die Verdienste Mayer's in das rechte Licht zu stellen, sondern die seines Rivalen gänzlich zu vernichten sucht. Während Mayer sich bemühte, seinen Gegner Joule in der grossmüthigen Anerkennung fremder Verdienste zu übertreffen, will Dühring in seinem Buche „Robert Mayer, der Galilei des 19. Jahrhunderts" (Chemnitz 1880) ausgesprochenermaassen das von Mayer Versäumte nachholen, und so denuncirt er Joule geradezu als einen directen Nachahmer Mayer's auf keinen anderen Grund hin, als weil Joule's erste Veröffentlichung zeitlich auf Mayer's erste Veröffentlichung folgte. „Der Fellow der Londoner Wissenschaftsakademie dünkte sich mit seinen paar Nachexperimenten ganz einzig. In der That aber war dieser Fellow ein Nachahmer, und wenn

---

den Verhältnissen als Bewegung, chemische Affinität, Cohäsion, Elektricität, Licht, Wärme und Magnetismus hervortreten, und aus jeder dieser Erscheinungen können alle übrigen hervorgebracht werden." (Allgem. Theor. der Bewegung etc., S. 103).

[1]) Vergl. „Allgem. Theorie der Bewegung etc.", Braunschweig 1869, S. 80 bis 84. Karl Friedrich Mohr (4. Nov. 1806 Coblenz bis 28. Sept. 1879 Bonn), erst Apotheker in Coblenz, dann 1864 Privatdocent und seit 1867 Prof. der Pharmacie in Bonn. Die hier erwähnte Abhandlung erschien als ein Nachtrag zu dem grösseren Werke „Mechanische Theorie der chemischen Affinität", Braunschweig 1868.

Erhaltung der Kraft, Mayer, Joule, Helmholtz, c. 1840 bis c. 1850.

man durchaus bei ihm von Talenten und Verdiensten reden will, so waren es eben Nachahmungstalente [1])." Diese Worte Dühring's charakterisiren so deutlich den polemischen Charakter seiner Schrift als eines unwissenschaftlichen Pamphlets [2]), dass wir mit gutem Gewissen die weitere Schilderung desselben unterlassen dürfen. Wir freuen uns vielmehr, nach diesen unerquicklichen Dissonanzen unseren Abschnitt mit den schönen Worten Tyndall's schliessen zu können, denen wir aus voller Seele zustimmen [3]): „Mayer's Arbeiten tragen gewissermaassen den Stempel einer tiefsinnigen Anschauung, welche jedoch in des Verfassers Geist die Kraft unzweifelhafter Ueberzeugung gewonnen hatte. Joule's Arbeiten sind im Gegentheil experimentelle Beweise. Mayer vollendete seine Theorie geistig und führte sie zu ihrer grossartigsten Anwendung. Joule arbeitete sich seine Theorie heraus und gab ihr die Sicherheit einer Naturwahrheit. Treu dem speculativen Instinct seines Landes zog Mayer grosse und wichtige Schlüsse aus seinen Vordersätzen, während der Engländer vor Allem darauf bedacht war, Thatsachen unwiderruflich festzustellen. Der künftige Historiograph der Wissenschaft wird, denke ich, diese Männer nicht als Widersacher hinstellen."

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Wie sich die neuen Anschauungen von dem Wesen und der Wirkungsweise der Naturkräfte nur langsam Bahn brachen, so konnte auch die **mechanische Wärmetheorie**, die in ihrem Fundamente auf diesen Anschauungen ruhte, nur langsam zur Ausbildung gelangen. Erst nachdem die Constanz des Umwandlungsverhältnisses von Wärme und mechanischer Arbeit allseitig bekannt und anerkannt war, vermochte man umgekehrt diese Erkenntniss zum Sturz der alten stofflichen Theorie der Wärme zu benutzen und die Nothwendigkeit der Ausbildung einer neuen Theorie allgemein fühlbar zu machen. Darum verging auch nach dem Erscheinen der Mayer'schen und Joule'schen Arbeiten fast ein volles Jahrzehnt, ehe die Bewegung auf dem Gebiete der Wärmelehre in vollen Fluss, aber dann auch zu desto schnellerer Vollendung kam. Zuerst bewegten sich die Arbeiten der Experimentalphysiker noch einige Jahre ganz in den alten Aufgaben, die freilich auch ihrerseits ohne weitere Absicht der Arbeiter von selbst von der alten Theorie ablenkten und in ihren Resultaten der neuen Theorie zu sicheren Grundlagen wurden.

Knoblauch [4]) nahm die Untersuchungen Melloni's über strah-

[1]) Robert Mayer, der Galilei des 19. Jahrhunderts, S. 56.

[2]) Wer durch den angeführten Satz noch nicht überzeugt sein sollte, wird ohne Mühe in dem Werke selbst viele, kräftigere Urtheile auffinden.

[3]) Tyndall: „Die Wärme, betrachtet als eine Art der Bewegung", Braunschweig 1867, S. 96 bis 97.

[4]) Karl Hermann Knoblauch, geboren am 11. April 1820 in Berlin, erst Privatdocent in Berlin, dann 1849 ausserordentlicher Professor in Marburg,

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

lende Wärme auf und führte sie erfolgreich weiter. In einer grossen Abhandlung: De calore radiante disquisitiones experimentis quibusdam novis illustratae (Berlin 1846) [1]), behandelte er ganz in der Weise wie Melloni, nur mit noch grösserer Vorsicht in der Vermeidung von Fehlerquellen [2]) und mit verbesserten Apparaten, den Durchgang der strahlenden Wärme durch diathermane Körper, die Erwärmung der Körper beim Durchgange der strahlenden Wärme, das Wärmeausstrahlungsvermögen der Körper, die Beschaffenheit der Wärmestrahlen, welche von verschiedenen Körpern bei verschiedenen Temperaturen ausgestrahlt werden, die von verschiedenen Körpern diffus reflectirte Wärme und endlich die Beschaffenheit der von verschiedenen Wärmequellen ausgesandten Lichtstrahlen. Als specielle Resultate dieser Untersuchungen giebt Knoblauch an: Der Durchgang der strahlenden Wärme durch diathermane Körper steht nicht in directer Beziehung zur Temperatur ihrer Quelle, sondern hängt nur von der Beschaffenheit der diathermanen Substanzen ab, welche von gewissen Wärmestrahlen in höherem Grade durchdrungen werden als von anderen, mögen diese bei niederer oder höherer Temperatur entstanden sein. Die Erhitzung eines Körpers durch strahlende Wärme ist bei stets gleicher Intensität der auf ihn eindringenden Strahlen unabhängig von der Temperatur der Quelle und wird allein durch die Natur des absorbirenden Körpers bedingt, welcher für gewisse Strahlen mehr als für andere empfänglich ist. Ein Körper erwärmt sich innerhalb gewisser Grenzen desto mehr, je dicker er ist, und zwar in um so höherem Grade, je weniger er für die ihm zugesandten Strahlen diatherman ist. Wärmeabsorption und Ausstrahlung entsprechen einander nur so weit, als sie Functionen eines und desselben Körpers sind und die Natur der Wärmestrahlen nicht in Betracht kommt. Der von Melloni aufgestellte Satz, dass das Ritzen der Oberfläche eines Körpers nur insofern auf das Wärmeausstrahlungsvermögen von Einfluss ist, als es die Dichtigkeit und Härte modificirt, und dass es dasselbe steigert oder vermindert, je nachdem es die betreffenden Stellen auflockert oder verdichtet, hat sich bestätigt. Das Ausstrahlungsvermögen eines Körpers ist von der Natur der Wärmestrahlen, durch deren Absorption er sich erwärmt, unabhängig. Die von den verschiedensten festen Körpern bei ungleicher Dicke und ungleicher Beschaffenheit ihrer Oberfläche ausgestrahlte Wärme ist durch die uns bis jetzt zu Gebote stehenden Mittel

---

seit 1853 ordentlicher Professor der Physik in Halle, auch Präsident der Leopoldinisch-Carolinischen Akademie.

[1]) Auch Pogg. Ann. LXX, S. 205 u. 337; LXXI, S. 1. Referat des Autors in „Fortschritte der Physik", herausgegeben von der Berl. phys. Ges., II, S. 280 bis 311.

[2]) Knoblauch verwendete z. B. für seine Galvanometerdrähte nur galvanisch niedergeschlagenes, also jedenfalls ganz eisenfreies Kupfer.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

als gleichartig und einfach erkannt worden, auf welche Weise sie auch innerhalb der Grenzen der bisherigen Versuche, d h. zwischen 30⁰ und 115⁰ C., in ihnen erregt worden sein mag. Die Diffusion, welche die Wärme an rauhen Oberflächen erleidet, steht in keinem Zusammenhang mit der Temperatur der Quelle. Die strahlende Wärme wird durch diffuse Reflexion in sehr verschiedener Weise, von einigen Körpern in sehr hohem Grade, von anderen gar nicht verändert. Bei einer und derselben Substanz sind diese Modificationen von dem Zustande ihrer Oberfläche unabhängig. Die Veränderungen der Wärme bei diffuser Reflexion werden ebensowohl durch die Natur der Wärmequellen, wie durch die Beschaffenheit der reflectirenden Körper bedingt. Sie sind nur die Folge einer auswählenden Absorption der reflectirenden Körper für gewisse ihnen zugesandte Wärmestrahlen. Die Mannigfaltigkeit der von einem und demselben Körper ausgehenden Wärmestrahlen ist bei höheren Wärmegraden grösser als bei niederen, wächst aber nicht beständig mit der Temperatur und steht nicht in wahrnehmbarer Beziehung zum Ausstrahlungsvermögen.

Diese Untersuchungen bewiesen abermals die Existenz verschiedenartiger Wärmestrahlen, die in ihren Verhältnissen, wie in ihrem Verhalten zu den Körpern ganz dieselben unterscheidenden Eigenthümlichkeiten zeigten, wie sie den verschiedenfarbigen Lichtstrahlen zukommen. Das veranlasste später auch, diese verschiedenartigen Wärmestrahlen als Wärmefarben zu bezeichnen, eine Analogie, die so vollständig ist, dass man aus ihr alle die vorigen Resultate nach dem entsprechenden Verhalten der Lichtstrahlen voraussagen kann. Damit aber war zur dringenden Aufgabe geworden, alle Eigenschaften der Lichtstrahlen, so weit sie nur nicht von einer ganz bestimmten Grösse der Wellenlänge abhängen, nun auch an den Wärmestrahlen nachzuweisen. Knoblauch verfolgte auch diese Aufgabe eifrig und glänzend weiter. Noch im Jahre 1848 veröffentlichte er in Poggendorff's Annalen mehrere, das Thema in gewissem Grade abschliessende Abhandlungen über Doppelbrechung, über Polarisation und über Beugung der strahlenden Wärme.

Bérard hatte gefunden, dass die beiden Bilder einer Lichtquelle im Kalkspathprisma dieselben Wärmeverhältnisse zeigen, und schloss daraus auf die Doppelbrechung der Wärme. Forbes und Melloni machten denselben Schluss, weil ein Glimmerblatt die Polarisation der Wärme in einem gewissen Grade aufzuheben vermochte. Knoblauch [1]) liess die Sonnenstrahlen von einem Heliostaten durch zwei hinter einander liegende enge Oeffnungen, die von zwei Paar Stahlschneiden gebildet wurden, auf einen Kalkspathkrystall werfen und untersuchte mittelst einer linearen Thermosäule von 0,26 mm Breite die Bilder. Er fand beim

---

[1]) Ueber die Doppelbrechung der strahlenden Wärme, Pogg. Ann. LXXIV, S. 1.

langsamen Vorrücken zuerst eine Ablenkung der Galvanometernadel von 20,5°, dann einen Rückgang auf 5°, dann wieder eine Abweichung von 20,75°. Durch weitere Versuche wies er sicher nach, dass die Wärmestrahlen durch Doppelbrechung in eine feststehende (ordentliche) und eine bewegliche (ausserordentliche) Strahlengruppe zerlegt werden, dass die beiden immer gleiche Intensität haben, dass das ausserordentliche Bündel stets im Hauptschnitt verschoben erscheint, dass beim Drehen des Krystalls das ausserordentliche Bündel sich um das ordentliche dreht, dass die beiden Bündel nicht getrennt werden, wenn die Strahlen parallel zur Achse einfallen, und dass also auch bei der Doppelbrechung die Wärmestrahlen sich ganz wie die Lichtstrahlen verhalten.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Um die Polarisation der Wärme durch Reflexion zu untersuchen, gab Knoblauch [1]) seinem Heliostaten einen Spiegel aus schwarzem Glase oder auch einen Stahlspiegel. Er fand bei Glas den Polarisationswinkel für Wärme dem für Licht nahezu gleich; beim Stahlspiegel fand das Maximum der Reflexion statt, wenn der Winkel der einfallenden Strahlen mit der Spiegelfläche 15° betrug.

Die Polarisation der Wärme durch einfache Brechung [2]), welche Melloni und Forbes mit Hülfe von Glimmerblättchen nachgewiesen, constatirte Knoblauch nun auch an Glasplatten; ebenso untersuchte er direct die Polarisation der Wärme, wie sie bei der Doppelbrechung auftritt [3]). Ueberall zeigten sich die entwickelten Gesetze in ganz gleicher Weise für Wärme, wie für Lichtstrahlen gültig.

Die Beugung der Wärmestrahlen [4]) bestimmte Knoblauch nicht bloss der Art, sondern auch der Grösse nach. Er maass die Ausbreitung der durch einen engen Spalt gehenden Wärmestrahlen bei verschiedener Entfernung und bei verschiedener Weite der Spalten mittelst der linearen Thermosäule direct und fand, dass diese Ausbreitung beständig grösser ist, als sie im Falle einer geradlinigen Begrenzung sein würde; und zwar zeigte sich diese Ausbreitung um so bedeutender, je enger der Spalt, durch den die Wärmestrahlen hindurchgingen, je grösser die Entfernung des Spaltes vom Thermoskop und je grösser seine Entfernung von der Wärmequelle war. Knoblauch, der vorher überall die früheren Arbeiten von Melloni, Forbes und Anderen anerkennend angeführt hatte, nimmt in Bezug auf die letzteren Versuche ausdrücklich die volle Priorität für sich in Anspruch.

---

[1]) Ueber die Polarisation der strahlenden Wärme durch Reflexion, Pogg. Ann. LXXIV, S. 161.

[2]) Ueber die Polarisation der Wärme durch einfache Brechung, Pogg. Ann. LXXIV, S. 170.

[3]) Ueber die Polarisation der Wärme durch Doppelbrechung, Pogg. Ann. LXXIV, S. 177.

[4]) Ueber die Beugung der strahlenden Wärme, Pogg. Ann. LXXIV, S. 9.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Fizeau und Foucault hätten zwar noch im Jahre 1847 [1]) im Schatten eines diathermanen Körpers eine Temperaturerhöhung, eingeschlossen von zwei Temperaturerniedrigungen, bemerkt, er aber habe die betreffenden Resultate schon am 7. August 1846 der physikalischen Gesellschaft in Berlin mitgetheilt, und bis zu diesem Zeitpunkte sei weder eine directe Beobachtung der Beugung der Wärme, noch auch ein Experiment bekannt gewesen, nach welchem indirect auf eine solche hätte geschlossen werden können [2]).

Mit Melloni's und Knoblauch's Arbeiten deckten sich in vielfachen Punkten die Untersuchungen, welche Desains und De la Provostaye um dieselbe Zeit über strahlende Wärme veröffentlichten. Sie fügten auch den Arbeiten der Vorigen manche neue Einzelheiten hinzu, wie sie 1849 z. B. zeigten, dass die Polarisationsebene der Wärmestrahlen ganz wie die der Lichtstrahlen durch den Magneten gedreht werde [3]), wandten sich aber dann, da man in der theoretischen Optik mit besonderem Fleisse den Zusammenhang zwischen Emission, Transmission und Absorption untersuchte, auch den entsprechenden Untersuchungen für die Wärmestrahlen zu. In einer Abhandlung [4]), ebenfalls vom Jahre 1849, constatirten sie, dass das Malus'sche Sinusquadratgesetz über die Intensitäten durch Brechung oder Reflexion veränderter, ursprünglich polarisirter Strahlen ebenso wie für das Licht, für die Wärme gelte, dass die Fresnel'schen Formeln für die Intensitäten des von durchsichtigen Körpern durchgelassenen und zurückgeworfenen Lichtes auch für die strahlende Wärme richtig, und dass endlich selbst die Gesetze der Metallreflexion für Wärme und Licht gleichmässig anwendbar seien. In einer grösseren Arbeit vom folgenden Jahre [5]) zeigten sie sich sogar bemüht, da die Messung der Lichtintensitäten immer nur eine unvollkommene sein konnte, die Fresnel'schen Reflexions- und Refractionsformeln zuerst für Wärme- und damit auch für Lichtstrahlen durch möglichst exacte Untersuchungen zu bestätigen, und kamen dabei zu den erwarteten Resultaten. Gleich darauf wandten sie sich dem Pro-

---

[1]) Compt. rend. XXV, p. 447, 1847; Pogg. Ann. LXXIII, S. 462. Auch bei den Fresnel'schen Spiegeln, wie bei der chromatischen Polarisation durch dünne Blättchen fanden Fizeau und Foucault die Wärmeintensitäten ganz entsprechend den Lichtintensitäten vertheilt. Fizeau berechnete noch im December 1847 aus den gemeinsamen Versuchen die Wellenlängen gewisser ultrarother Strahlen des Spectrums zu 0,001101, 0,001196, 0,001320, 0,001448, 0,001745 und 0,001940 mm.

[2]) „Ausser einem Experiment von Matteucci (Bibl. universelle L, p. 1, 1834 und LVII, p. 74, auch Pogg. Ann. XX, S. 462 und XXXV, S. 558) in Betreff der Wärmeinterferenz, welches nach dem Urtheil der mit diesen Untersuchungen vertrauten Physiker keinen Glauben verdient, war bis zum Jahre 1846 selbst keine Beobachtung bekannt, aus der man indirect einen Schluss auf die gedachte Erscheinung hätte ziehen können."

[3]) Compt. rend. XXIX, p. 352.

[4]) Compt. rend. XXIX, p. 121.

[5]) Ann. de chim. et de phys. (3) XXX, p. 159, 1850.

blem der Wärmeabsorption[1]) zu, das sie in drei verschiedene Aufgaben zerlegten, nämlich erstens die Entscheidung über die Gleichheit oder Proportionalität des Emissions- und Absorptionsvermögens der Körper, zweitens die Untersuchung der Abhängigkeit des Absorptionsvermögens von der Art der einfallenden Wärmestrahlen und drittens die Messung der absoluten Grösse der Absorption.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Da die letztere Aufgabe bisher nur einmal von Leslie in Angriff genommen war, so hielten sie sich zuerst an diese. Während aber bis dahin De la Provostaye und Desains mit den anderen Bearbeitern desselben Gebietes in Uebereinstimmung gewesen waren, so geriethen sie nun auf diesem schwierigen Terrain, wo es sich um die Uebertragung von Aetherbewegungen auf die ponderable Materie handelte, mit denselben in bedeutende Differenzen. Melloni hatte gefunden, dass Steinsalz alle Wärmestrahlen gleich gut durchlässt, und hatte den geringen Verlust, welchen die Wärme beim Durchgange durch Steinsalz erfährt, durch eine geringe diffuse Reflexion erklärt. Noch im Jahre 1853 hatte er diese Ansicht wieder in den Worten ausgesprochen: „Es giebt also wirklich ein starres Medium, welches alle Arten von Wärmestrahlen mit gleicher Leichtigkeit durchlässt[2]).“ Dem gegenüber kamen De la Provostaye und Desains zu dem Resultate[3]), dass die Absorption des Steinsalzes für leuchtende Wärmestrahlen zwar unmerklich sei, für dunkle Wärmestrahlen aber bis zu den nicht zu übersehenden Werthen 0,08 bis 0,09 steige. Der Streit blieb mit dem im nächsten Jahre erfolgenden Tode Melloni's ruhen, führte später aber zu einem neuen. Knoblauch schloss sich im Jahre 1863[4]) der Meinung Melloni's an und behauptete, dass das Steinsalz, wenn es nur ganz rein, für alle Wärmestrahlen gleich durchlässig, also für Wärme vollkommen durchsichtig oder diatherman sei. Magnus aber gelangte 1869 wieder zu der abweichenden Ueberzeugung[5]), dass Steinsalz monothermisch, wie sein Dampf monochromatisch sich zeige, dass es also erhitzt nur eine Art von Wärmestrahlen aussende und dass es darum auch, nach dem Gesetz der Gleichheit von Emission und Absorption, diese Art von Wärmestrahlen absorbiren müsse. Die grosse Diathermansie des Steinsalzes beruhe danach nicht auf einem verschwindend kleinen Absorptionsvermögen, sondern nur auf der Eigenschaft, dass es nur eine Wärmeart absorbire und dass gerade diese Art von den meisten Körpern bei gewöhnlichen Erhitzungen nicht ausgesandt werde. Knoblauch widersprach auf Grund neuer Versuche auch

---

[1]) Ann. de chim. et de phys. (3) XXX, p. 431, 1850.

[2]) Pogg. Ann. LXXXIX, S. 84, 1853.

[3]) Compt. rend. XXXVII, p. 168, 1853. Fréderic Hervé de la Provostaye (15. Febr. 1812 Redon, Dep. Ille-et-Villaine — 28. Dec. 1863 Algier), Inspector des öffentlichen Unterrichts. Paul Quentin Desains, 12. Juli 1817 St. Quentin bis 3. Mai 1885 Paris, Professor der Physik an der Sorbonne.

[4]) Pogg. Ann. CXX, S. 177, 1863.

[5]) Ibid. CXXXVIII, S. 333, 1869.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

diesen Sätzen von Magnus in ganz bestimmter Weise [1]); trotzdem ist die Sache noch zu keinem Entscheid gekommen, und es gilt für wahrscheinlich, dass in den Versuchen von Knoblauch, wie denen von Magnus bedeutende Fehlerquellen sich geltend gemacht haben.

Diese Untersuchungen über strahlende Wärme haben manches Charakteristische. Alle ihre allgemeinen Resultate wären bei einer Identificirung des Licht- und Wärmeäthers leicht aus einer Undulationstheorie der strahlenden Wärme und dem daraus folgenden Begriff der Wärmefarben abzuleiten gewesen. Da aber diese Hypothese noch ohne genügende Begründung erschien [2]), so war es methodisch durchaus richtig, jene Eigenschaften der Wärmestrahlen rein experimentell abzuleiten, die Hypothese der Wärmefarben nur als leitende Idee zu gebrauchen und schliesslich durch die Ergebnisse diese Idee selbst zu verificiren. Insofern hatten diese Untersuchungen immer ein grosses theoretisches Interesse, wenn sie auch neue, überraschende Aufschlüsse nicht erwarten liessen. Mit der Annahme der Identität des Licht- und Wärmeäthers, die durch jene Untersuchungen am Ende der vierziger Jahre erfolgte, erlosch dieses allgemeine Interesse allerdings. Dafür trat nun die neue Aufgabe hervor, die Wärmefarben der Stoffe im Einzelnen zu bestimmen und, vor Allem auch bei Flüssigkeiten und Gasen, die Absorptionsfähigkeit für Wärme, von welcher ja die Wärmefarben der Hauptsache nach abhängen und für welche bis dahin auf diesem Gebiete noch wenig gethan war, genauer zu untersuchen. So beschäftigte sich R. Franz von 1855 an in mehreren Abhandlungen eingehend mit der Diathermansie gefärbter Flüssigkeiten [3]). Tyndall entdeckte 1862 eine grosse Durchlässigkeit für dunkle Wärmestrahlen an dem in Schwefelkohlenstoff gelösten Jod [4]), Barett ebenso an Chlorkohlenstoff. Schwerer

[1]) Pogg. Ann. CXXXIX, S. 150, 1870.

[2]) In den „Fortschritten der Physik im Jahre 1846, herausgegeben von der Berliner phys. Gesellschaft“ findet sich in einem Referat über ein Werk von Laurent die Stelle (Bd. II, S. 166): Das beruht „auf der noch nicht fest genug gestellten Hypothese, dass das Licht und die strahlende Wärme durch Bewegungen in einem und demselben Medium hervorgerufen werden“. Dagegen war Melloni durch seine Untersuchungen schon im Jahre 1842 zur Ueberzeugung von der Identität des Licht- und Wärmeäthers gelangt, obgleich auch er früher die Sache noch zweifelhaft gelassen hatte. (Siehe diesen Band, S. 233.) Er sagt (Ueber die Identität der verschiedenen leuchtenden, wärmenden und chemisch wirkenden Strahlen, Compt. rend. XV, p. 454; Pogg. Ann. LVII, S. 300): „Licht, Wärme und chemische Wirkungen sind die Aeusserungen der Aetherundulationen, welche die Sonnenstrahlen ausmachen, . . . zwar unterscheiden sich die leuchtenden Strahlen von allen übrigen durch ihre Sichtbarkeit; allein diese Eigenschaft entspringt aus einer wahrhaft zufälligen Qualität. . . . Die Wärme, welche in den von diesen Strahlen getroffenen Körpern entwickelt wird, besteht in der von den Aetherpulsationen den wägbaren Massen mitgetheilten Bewegungsgrösse.“

[3]) Pogg. Ann. XCIV, S. 337, und CI, S. 46. R. Franz, geb. am 16. Jan. 1827 in Berlin, Professor am Gymnasium zum grauen Kloster daselbst.

[4]) Ibid. CXXIV, S. 36.

wegen der Geringfügigkeit der Wirkungen, aber auch besonders wichtig wegen des Einflusses der Erdatmosphäre auf die Sonnenstrahlen, war die Untersuchung der Diathermansie der Gase. R. Franz veröffentlichte in den oben erwähnten Abhandlungen auch derartige Messungen; umfangreichere, sicherere Resultate aber erhielten erst Tyndall [1]) und Magnus [2]), obgleich auch deren Ergebnisse vielfache Abweichungen, ja sogar directe Widersprüche zeigten. Wenigstens stimmten die beiden letzteren Physiker darin überein, dass die Wärmeabsorption bei einfachen Gasen sehr gering ist und nur bei zusammengesetzten Gasen stark wächst. Dafür fand Tyndall bei feuchter Luft eine sehr starke Wärmeabsorption, während Magnus auch das Wassergas für nahezu diatherman erklärte. Die Frage blieb danach längere Zeit streitig und unentschieden und fand Freunde und Gegner auf beiden Seiten. Schliesslich konnte Magnus doch zum mindesten sehr wahrscheinlich machen, dass die von Tyndall scheinbar beobachtete Wärmeabsorption in den Wasserdämpfen nicht von diesen, sondern von feinen Wassertröpfchen herrührte, die sich an den Flächen des Apparates niedergeschlagen hatten und die allerdings die Wärme stark absorbiren [3]).

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Ebenfalls von dem Gedanken an die Identität von Licht- und Wärmebewegungen, speciell der Wellenflächen beider geleitet, ging man in dieser Periode auch dazu über, die eigenthümliche Verbreitung der Wärme in krystallisirten Substanzen zu untersuchen. H. de Sénarmont [4]) schnitt zu dem Zwecke aus den zu untersuchenden Krystallen mehrere dünne, meist kreisförmig begrenzte Platten von überall gleicher Dicke, deren Flächen den krystallographischen Achsen parallel liefen. Durch die Mitte der Platte wurde dann ein silbernes Rohr gesteckt, durch welches ein heisser Luftstrom geleitet wurde. Die Scheiben waren mit Wachs überzogen, und das Schmelzen dieses Ueberzuges gab den Gang der Wärme an. An einer grossen Anzahl von Körpern fand er folgende Resultate: 1) in allen Krystallen des regulären Systems ist die Wärmeleitung nach allen Seiten gleich, die isothermen Flächen sind Kugelschalen; 2) in allen Krystallen des II. und VI. Systems hat die Leitung im Sinne der krystallographischen Achse einen Maximal- oder Minimalwerth, in allen anderen Richtungen ist sie gleich. Die

---

[1]) Phil. Mag. (4) XXII, p. 377; XXV. p. 203; XXVI, p. 36; XXXII, p. 118; Pogg. Ann. CXIII, S. 1; CXIV, S. 632 und CXVI, S. 1 und 289.

[2]) Pogg. Ann. CXIV, S. 635; CXVIII, S. 575; CXXI, S. 174 und 186; endlich CXXX, S. 207.

[3]) H. Wild (Pogg. Ann. CXXIX, S. 57) hatte sich nach Versuchen, die er nach Tyndall's Methode anstellte, auch für dessen Ansicht entschieden. H. Buff (Pogg. Ann. CLVIII, S. 205) fand nach eigener Methode dieselben Resultate wie Magnus.

[4]) Compt. rend. XXV, p. 459 und 707, 1847; Ann. de chim. et de phys. (3) XXI, p. 457 und XXII, p. 179; Pogg. Ann. LXXIII, S. 191; LXXIV, S. 190; LXXV, S. 50 und 482, 1848.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

isothermen Flächen sind in Bezug auf die Symmetrieachse verlängerte oder abgeplattete Rotationsellipsoide; 3) in den Krystallen des III. Systems bilden die isothermen Flächen ungleichachsige Ellipsoide, deren Achsen mit den Kanten des rechtwinkeligen Prismas zusammenfallen; 4) in allen Krystallen des IV. Systems ist es ebenso, doch ist nur die eine der Achsen der krystallographischen Achse parallel, die Lage der anderen ist nicht im Voraus bestimmbar; 5) bei dem V. System sind die isothermen Flächen ungleichachsige Ellipsoide, deren Achsenlage durch kein Gesetz a priori bestimmt werden konnte. Bald darauf zeigte Sénarmont noch, dass auch comprimirte Gläser sich der Wärmeleitung gegenüber wie krystallinische Substanzen verhalten. Die Resultate Sénarmont's wurden sogleich von Biot und Duhamel als Mitgliedern der zur Begutachtung der Sénarmont'schen Arbeit niedergesetzten Commission [1]), wie auch von Knoblauch [2]) u. A. bestätigt. Später constatirten E. Jannetaz [3]) und auch V. v. Lang [4]) noch weiter, dass in einachsigen Krystallen fast immer die optischen Wellenflächen und die isothermen Flächen einander so entsprechen, dass Krystalle zu gleicher Zeit optisch und thermisch positiv oder negativ sind.

Sénarmont selbst sagt über die gefundene Uebereinstimmung zwischen den optischen Achsen und denen der thermischen Leitungsfähigkeit: „Sind diese Analogien nur scheinbar und bloss durch die Symmetrie der Formen erzeugt und ist zwischen den Erscheinungen kein ursprünglicher Zusammenhang vorhanden, oder ergaben sie sich vielmehr als eine Folgerung aus einem und demselben, nur durch die Constanten unterschiedenen Gesetz? Dies sind Fragen, die sich jetzt unmöglich beantworten lassen. Wie dem auch sei, so muss man doch gegenwärtig für vollkommen bewiesen erachten, dass die Coëfficienten der Leitungsfähigkeit, wie die der Elasticität, der Dilatation und der Refraction sich in krystallinischen Mitteln mit der betrachteten Richtung ändern; und nicht minder einleuchtend ist, dass die Molecularconstitution der Körper auf diese verschiedenen Classen von Erscheinungen Einflüsse von gleicher Ordnung ausübt, die uns wahrscheinlich auf eine sehr einfache Weise mit einander verknüpft erscheinen würden, wenn wir die Gesetze dieser Constitution selbst kennten“ [5]).

---

[1]) Compt. rend. XXV, p. 829.

[2]) Pogg. Ann. XCIII, S. 161, 1854.

[3]) Ann. de chim. et de phys. (4) XXIX, p. 5, 1873.

[4]) Pogg. Ann. CXXXV, S. 29, 1868.

[5]) Pogg. Ann. LXXV, S. 498 bis 499 und 500 bis 501, 1848. Henri Hureau de Sénarmont (6. September 1808 Broué, Dép. Eure-et-Loire — 30. Juni 1862 Paris), Professor der Mineralogie an der École des Mines und Examinator für Physik an der École polytechnique in Paris.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Das Werden der neuen Anschauung vom Wesen der Kraft zeigte sich charakteristisch um diese Zeit auch in den mannigfachen Versuchen, die Menge der bei gewissen chemischen Verbindungen producirten Wärme zu bestimmen und dadurch mittelbar die chemischen Kräfte auf ein bestimmtes Maass zurückzuführen. Wir benutzen zur Arbeitsleistung auf der Erde nur drei Quellen der Kraft: Die lebendige Kraft strömenden Wassers und strömender Luft, die chemischen Kräfte brennbarer, organischer Stoffe und die Muskelkräfte lebendiger Wesen. Die Kräfte der ersteren Art waren seit langer Zeit behandelt und ihrer Wirkung nach nicht unbekannt, mit denen der zweiten und dritten Art mussten die Physiker, welche sich für die Erhaltung der Kraft interessirten, sich erst noch besonders und eingehend beschäftigen. Zu der Untersuchung der durch chemische Processe hervorgebrachten Wärme drängte ausserdem noch die praktische Wichtigkeit dieser Wärmequellen. Aus diesem letzteren Beweggrunde hatten schon Lavoisier, Crawford, Rumford, Dalton u. A. bestimmte Mengen brennbarer Stoffe in Calorimetern verbrannt und die Verbrennungswärme gemessen; doch war es ihnen dabei, eben des praktischen Gesichtspunktes wegen, weniger auf die absolute Menge der entstandenen Wärme als auf die Verhältnisse derselben, auf die Constatirung des besten Brennmaterials angekommen [1]). Genauere Resultate erzielten erst Dulong [2]) um das Jahr 1838 und ein Jahrzehnt später Andrews [3]), Favre und Silbermann [4]), welche die durch Verbindung bestimmter Gewichte oder bestimmter Volumina erzeugten Wärmemengen genau in Wärmeeinheiten angaben. Indessen wichen doch alle die Angaben sehr von einander ab, und die Abweichungen waren bei der Anwesenheit so vieler Fehlerquellen in den Apparaten auch kaum zu vermeiden. Ausserdem aber

---

[1]) Vergleiche für diese älteren Arbeiten Gehler's physikalisches Wörterbuch, 2. Auflage, X, S. 236 bis 396.

[2]) Compt. rend. VII, p. 871, 1838 (posthum.); Pogg. Ann. XLV, S. 461.

[3]) Wärmeentwickelung bei Verbindung von Säuren und Basen, Trans. Irish Acad. XIX, 1843; Pogg. Ann. LIV, S. 208; bei Bildung von Chlor-, Brom- und Jodmetallen, Trans. Irish Acad. XIX; Pogg. Ann. LIX, S. 428; Temperaturveränderungen beim Austausch von Basen, Phil. Trans. 1844, p. 21; Pogg. Ann. LXVI, S. 31; Wärmeentwickelung bei Verbindung der Körper mit Sauerstoff und Chlor, Phil. Mag. XXXII; Pogg. Ann. LXXV, S. 27 und 244; Wärmeentwickelung bei Austausch von Metallen, Phil. Trans. 1848, p. 91; Pogg. Ann. LXXXI, S. 73.

[4]) Recherches sur les quantités de chaleur dégagées dans les actions chimiques et moléculaires, Ann. de chim. et de phys. (3) XXXIV, p. 357, und XXXVI, p. 5, 1852; XXXVII, p. 406, 1853. Auch schon in Compt. rend. XX, p. 1565; XXI, p. 944; XXVI, p. 595; XXVII, p. 56; XXVIII, p. 627; XXIX, p. 449. In Compt. rend. XXVIII, p. 666, 1848 theilt die von der Pariser Akademie niedergesetzte Commission (Regnault, Dumas, Pouillet und Gay-Lussac) mit, dass zur Lösung der Aufgabe „Théorie de la chaleur dégagée dans les combinaisons chimiques“ sechs Arbeiten eingelaufen seien, von denen aber keine mit

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

war bei keinem jener Versuche der Antheil der chemischen Kraft, welche nicht zur Temperaturerhöhung, sondern auf innere Arbeit verwandt wurde, auch nur annähernd zu bestimmen. Darum waren jene Zahlenangaben wohl im Einzelnen werthvoll, zu sicheren allgemeinen Sätzen über das quantitative Umwandlungsverhältniss, den Zusammenhang der chemischen Kräfte und der Wärme konnten sie darum nicht führen. Dasselbe gilt auch, doch schon in beschränkterem Maasse, noch von den neueren, das ganze Gebiet der Thermochemie umfassenden Arbeiten J. Thomson's[1]) und M. Berthelot's[2]). Zwar wurde der schon 1840 von G. H. Hess aufgestellte und dem Gesetz von der Erhaltung der Energie entsprechende Satz: „Die einem chemischen Vorgange entsprechende Wärmeentwickelung ist dieselbe, ob der Vorgang in verschiedenen Abtheilungen oder auf einmal durchlaufen wird", empirisch bestätigt und theoretisch begründet; der weitergehende Satz Berthelot's aber, nach dem jede chemische Umwandlung, welche ohne Hülfe einer fremden Energie vollendet wird, zur Bildung des Körpers oder des Systems von Körpern strebt, für den die Wärmeentwickelung ein Maximum ist, konnte gegen die vielfachen Angriffe nicht ganz gesichert werden.

Unter der Unsicherheit über die bei chemischen Verbindungen entstehende Wärme litten auch die Untersuchungen über die Quelle der Muskelkraft der Thiere und Menschen. Nach dem Gesetz von der Erhaltung der Kraft müssen die thierische Wärme wie die thierische Arbeitsfähigkeit aus derselben Quelle, der thierischen Nahrung, stammen. Aber für eine exacte Vergleichung der hier wirksamen Ursachen mit ihren Wirkungen fehlten eben noch die experimentellen Grundlagen, die

---

dem grossen Preise gekrönt werden solle. Favre und Silbermann erhielten für ihre Arbeiten 1500 Frcs. und ein Mémoire, das in Trans. Irish Acad. (Andrews) schon gedruckt war, 1000 Frcs. Thomas Andrews (19. December 1813, Belfast — 26. November 1885, Belfast) zuerst praktischer Arzt, dann Professor der Chemie am Queen's College in Belfast. Pierre Antoine Favre (20. Februar 1813 Lyon — 17. Februar 1880 Marseille) machte die betreffenden Arbeiten mit Silbermann als Assistent am Conservatoire des Arts-et-Métiers in Paris, danach war er assistirender Professor der Chemie an der medicinischen Facultät in Paris und zuletzt Professor der Chemie in Marseille. Johann Theobald Silbermann (1. December 1806 Pont d'Aspach, Dep. Ober-Rhein — Juli 1865 Paris), Conservator der Sammlungen des Conservatoire des Arts-et-Métiers.

[1]) Thermochemische Untersuchungen, 4 Bde., Leipzig; auch in Pogg. Ann. von Bd. LXXXVIII, 1853, in vielen Abhandlungen. Hans Peter Jörgen Thomsen, geboren am 26. Februar 1826 in Kopenhagen, Professor der Chemie daselbst.

[2]) Mécanique chimique fondée sur la Thermochimie, 2 Bde., Paris 1879; auch in Ann. de chim. et de phys. (4) von Bd. VI, 1865, in mehreren Abhandlungen. Marcellin Pierre Eugène Berthelot, geboren am 29. October 1827 in Paris, Professor der Chemie daselbst.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Messungen der mechanischen Leistungsfähigkeit der Thiere, die Bestimmung der in ihnen producirten Wärme, wie die Kenntniss des thermischen Aequivalents der aufgenommenen Nahrung. So konnten die Begründer des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft die Geltung desselben auch in der organischen Welt wohl wahrscheinlich machen, aber doch nicht sicher nachweisen, und so blieb gerade die Physiologie ein Feld, auf dem sich noch länger als sonst irgendwo die abenteuerlichsten Meinungen über die Production von Wärme und mechanischer Arbeit breit machen konnten. Dulong[1]) fand um das Jahr 1815 die aus den Respirationsproducten berechnete Wärme nur 0,723 von der am Körper beobachteten Wärme, Despretz[2]) gab 1823 statt dessen die Zahl 0,811 an und Helmholtz constatirte noch im Jahre 1847, dass die bis dahin erlangten Resultate die erstere Wärme um $^1/_{20}$ bis $^1/_{10}$ kleiner erscheinen lassen als die letztere. Doch machte der Letztere dabei sogleich auch darauf aufmerksam, dass die berechneten Verbrennungswärmen der Respirationsproducte den wirklichen Verbrennungswerthen der aufgenommenen Nahrung jedenfalls nicht genau entsprächen, dass der Widerspruch dieser Resultate gegen das Princip von der Erhaltung der Kraft nur ein scheinbarer sein könne und dass diese Resultate bei der Geringfügigkeit der Differenz eher als eine Bestätigung jenes Princips anzusehen seien[3]).

Von geringerem theoretischen Interesse, aber desto grösserer technischer Wichtigkeit waren die Messungen der Wärmeconstanten, der specifischen Wärme, der Schmelz- und Verdampfungswärmen, der Elasticität der Gase und Dämpfe bei verschiedenen Temperaturen u. s. w., welche in dieser Periode von Regnault zu grosser Vollendung gebracht wurden. Es liegt in der allgemeinen Natur, wie in dem speciellen Plane unseres Werkes, dass wir auf diese Messungen nicht näher eingehen können, trotzdem sie auch methodisch interessant und höchst lehrreich sind. Wir begnügen uns damit, hier auf die grosse Sammlung von Arbeiten hinzuweisen, denen Regnault seine wichtigsten früheren physikalischen Abhandlungen einverleibte und die noch heute von den Physikern als officielle Quelle für die meisten Constanten der Wärmelehre angesehen wird. Diese Sammlung führt den Titel: Relation des expériences entreprises par ordre de M. le Ministre des Travaux publics et sur la proposition de la Commission centrale des machines à vapeur, pour déterminer les principales lois et les données

[1]) Ann. de chim. et de phys. I, 1816.

[2]) Ibid. XXVI, 1824; 1823 von der Pariser Akademie gekrönt. César Mansuète Despretz (10. Mai 1792 Lessines, Belgien — 15. März 1863, Paris) Professor der Physik an der Sorbonne.

[3]) „Die Fortschritte der Physik im Jahre 1845“, dargestellt von der physikalischen Gesellschaft in Berlin I, S. 353. „Ueber die Erhaltung der Kraft“, 1847, S. 70.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

numériques qui entrent dans le calcul des machines à vapeur; sie erschien in zwei Theilen im XXI. und XXVI. Bande der Mémoires de l'académie des sciences in den Jahren 1847 und 1862.

Die erste Abtheilung enthält auf 760 Seiten folgende zehn, grösstentheils schon früher veröffentlichte Abhandlungen: 1) Sur la dilatation des fluides élastiques[1]; 2) Sur la détermination de la densité des gaz[2]; 3) Détermination du poids du litre d'air et de la densité du mercure[3]; 4) De la mesure des températures[4]; 5) De la dilatation absolue du mercure; 6) Sur la loi de la compressibilité des fluides élastiques[5]; 7) De la compressibilité des liquides et en particulier de celle du mercure; 8) Des forces élastiques de la vapeur d'eau aux différentes températures[6]; 9) Sur la chaleur latente de la vapeur aqueuse à saturation sous diverses pressions[7]; 10) Sur la chaleur spécifique de l'eau liquide aux diverses températures[8]. Die zweite Abtheilung enthält auf 915 Seiten

---

[1]) Ann. de chim. et de phys. (3) IV und V, 1842; Pogg. Ann. LV, S. 391 und 557; LVII, S. 115.

[2]) Ann. de chim. et de phys. (3) XIV, 1845; Pogg. Ann. LXV, S. 395.

[3]) Pogg. Ann. LXXIV, S. 202. 1 Liter atmosph. Luft bei 0° C. und 760 mm Druck wiegt 1,293187 g.

[4]) Zum Theil in Pogg. Ann. LVII, S. 199. Wasserstoff und Kohlensäure befolgen von 0° bis 350° C. das Ausdehnungsgesetz und geben also die vollkommensten Thermometer, Quecksilber dehnt sich nicht so gleichmässig aus. Die thermo-elektrischen Apparate sind zum Messen der Temperatur ganz ungeeignet, weil 1° Wärme je nach der Temperatur eine ganz verschiedene elektromotorische Kraft entwickelt.

[5]) Compt. rend. XXIII, p. 787; Pogg. Ann. LXVII, S. 534. Das Mariotte'sche Gesetz ist auch für permanente Gase nicht in aller Strenge gültig, für atmosphärische Luft z. B. ist $\frac{V_0 : V_1}{P_1 : P_0}$ grösser, für Wasserstoff kleiner als 1.

[6]) Ann. de chim. et de phys. (3) XI; Pogg. Ann. LXV, S. 360; Ergänzungsband II, S. 119. Um eine empirische (Interpolations-) Formel zur Berechnung der Elasticität zu erhalten, folgt Regnault einem Vorschlage Biot's und setzt die Elasticität proportional der Summe $a^t + b^t$. Magnus (Pogg. Ann. LXI, S. 225, 1844) benutzt zu demselben Zwecke die schon von August (ibid. XIII, S. 122) und Strehlke (ibid. LVIII, S. 334) vorgeschlagene Form $e = a \,.\, b^{\frac{t}{\gamma + t}}$ und findet $e = 4{,}525\,\text{mm} \,.\, 10^{\frac{7{,}4475\,t}{234{,}69 + t}}$. Holtzmann giebt (Pogg. Ann. LXVII, S. 382) $\log \frac{p}{p_0} = \frac{5{,}2555\,t}{336{,}22 + t}$, die mit der von Magnus ziemlich übereinstimmt und die er auch gegen Regnault vertheidigt. Die „Fortschritte der Physik im Jahre 1845" (Bd. I, S. 90 bis 98) zählen an Formeln, die zur Berechnung der Elasticität des Wasserdampfes aufgestellt sind, die stattliche Anzahl von 40 auf.

[7]) Pogg. Ann. LXXVIII, S. 196 und 523. Die latente Wärme des Wasserdampfes ist keine Constante, sondern gleich $606{,}5 + 0{,}305\,t$ zu setzen.

[8]) Pogg. Ann. LXXIX, S. 241.

die drei Abhandlungen: 1) Mémoire sur la chaleur spécifique des fluides élastiques; 2) Mémoire sur les forces élastiques des vapeurs; 3) Mémoire sur les chaleurs latentes des vapeurs sous diverses pressions.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Nach diesen grossen Arbeiten hat Regnault noch einmal auf die Ausdehnung der Gase zurückgegriffen und in einer Abhandlung, welche er am 11. October 1869 der Pariser Akademie überreichte, deren einzelne Theile aber bis in den Anfang der fünfziger Jahre zurück datirten, vor Allem die bei der Volumveränderung der Gase verbrauchte oder producirte Wärme bestimmt. Er zog dabei aus seinen Versuchen die ganz berechtigte Folgerung, dass manche Wärmewirkungen, die man sonst der Reibung oder auch der Verdunstung zugeschrieben, mehr als diesen den Volumveränderungen der Körper zuzutheilen seien, und führte dafür vor Allem die Erwärmung der Geschosse und das Gefrieren der ausströmenden flüssigen Kohlensäure an [1]).

Eine andere alte, weit zurückreichende Aufgabe aus der Wärmetheorie fand jetzt wieder erhöhte Beachtung, weniger hervorgerufen durch den Gang der wissenschaftlichen Entwickelung, als durch die eifrigen Arbeiten eines einzelnen enthusiastischen Physikers, der allerdings dabei durch das neu erwachte Interesse an allen Problemen der Wärmetheorie unterstützt wurde. Es war dies der sogenannte Leidenfrost'sche Versuch. Nach Leidenfrost selbst hatten manche Physiker, wie J. H. Ziegler, J. H. Lambert, K. W. G. Kastner und besonders ausführlich M. H. Klaproth, sich mit jener Erscheinung beschäftigt, ohne zu mehr als dem negativen Resultat zu gelangen, dass die Geschwindigkeit der Verdampfung keineswegs, wie Leidenfrost angenommen, der Temperatur umgekehrt proportional sei. Erst Rumford gab eigentlich eine Erklärung [2]) des Phänomens, indem er behauptete, dass die dem Tropfen zugehende Wärme theils von der glatten Oberfläche zurückgeworfen werde, theils ohne jede Absorption durch den Tropfen hindurchgehe. Rumford wies auch zuerst die geringe Wärme des Tropfens nach, indem er denselben aus dem Tiegel in die Hand fallen liess, wo er wohl eine merkliche Wärme zeigte, aber doch die Hand nicht verbrannte. J. W. Döbereiner [3]), der die Tropfen im Tiegel bis zur Wallnussgrösse erzeugte, maass durch Eintauchen eines Thermometers die Temperatur desselben auf 99 bis 101° C., jedenfalls noch zu hoch, weil das Thermometer nicht ganz vor der directen Wärmestrahlung des Tiegels geschützt werden konnte. Aus der verhältnissmässig niedrigen Temperatur folgte aber nur das Nichtverdampfen des Tropfens, für die

---

1) Compt. rend. LXIX, S. 780, 1869. Henri Victor Regnault (21. Juli 1810 Aachen — 19. Januar 1878 Auteuil), Professor der Physik und Chemie in Paris, auch Director der Porzellanfabrik in Sèvres.

2) Mém. sur la chaleur, Paris 1804, p. 93; Gilbert's Ann. XVII, S. 33, 1804.

3) Schweigger's Journ. XXIX, S. 43, 1820; Gilbert's Ann. LXXII, S. 211. Joh. Wolfg. Döbereiner, 1780—1849, Professor der Chemie in Jena.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Gestaltung desselben machte J. Perkins vor Allem die abstossende Kraft der Wärme geltend. Zu dieser Behauptung war er durch eine zufällige, merkwürdige Beobachtung im Jahre 1827 veranlasst worden[1]. Der Dampfkessel einer Hochdruckmaschine zersprang mit starkem Knall, trotzdem aber arbeitete die Maschine ohne Minderung weiter. Erst als das Feuer gedämpft wurde und der Dampfkessel sich kühlte, strömte das Wasser in einem bestimmten Momente durch den entstandenen Riss mit schrecklichem Getöse ins Feuer. Perkins schloss daraus, dass stark erhitztes Metall durch die Repulsionskraft der Wärme das Wasser und selbst den Wasserdampf bis auf eine Entfernung von mindestens $^1/_{16}$ Zoll so stark abstosse, dass die Berührung aufgehoben werde. Auch Libri hatte noch vor Perkins auf eine Abstossung, welche der Wärmestoff gegen die ponderable Materie ausübt, geschlossen, da er beobachtete, dass ein Tropfen an einem Metalldraht, wenn der letztere erhitzt wird, sich von der erhitzten Stelle entfernt. Indessen kam man bald zu der Ansicht, dass diese wie alle ähnlichen Erscheinungen nicht direct durch die Repulsion des Wärmestoffs, sondern vielmehr durch die Ströme des entwickelten Dampfes verursacht werden. Man liess danach auch den Gedanken an eine weiter reichende Repulsion der Wärme wenigstens bei der Erklärung des Leidenfrost'schen Phänomens fast ganz fallen und gab dafür zur Erklärung an, dass die Wärme nicht bloss die Cohäsion der Theile eines Körpers, sondern noch mehr die Adhäsion zwischen Wasser und Dampftiegel aufhebe, und dass danach die Cohäsion der Wassertheilchen ungehindert den Tropfen zur Kugel gestalten könne[2].

Damit war nun allerdings die Möglichkeit einer Gestaltung des Tropfens im Tiegel ziemlich plausibel gemacht, dagegen erhoben sich dann wieder Zweifel über die Ursache seiner niederen Temperatur. Baudrimont[3] erklärte, dass der Dampf die Flüssigkeit im Tiegel hebe und die durch Strahlung zugeführte Wärme durch die Verdunstungskälte compensirt werde. N. W. Fischer wollte beobachtet haben[4], dass die Flüssigkeit im glühenden Tiegel nicht bloss verdampfe, sondern auch chemisch zersetzt werde, und glaubte, alle dem Tropfen zuströmende Wärme werde auf diese Zersetzung verwandt.

Trotzdem kam Boutigny[5] im Jahre 1840 wieder zu der Ueber-

---

[1]) Pogg. Ann. XII, S. 316, 1827. Jac. Perkins, 1766—1849, Civil-Ingenieur in London.

[2]) Welche Erwartungen man von dieser Entdeckung einer Aufhebung der Adhäsion (oder der Attraction zwischen den Körpern) hegte, ersieht man aus den Worten von Berzelius (Ber. über d. Fortschritte d. Physik und Chemie VI, S. 26, 1826): „Wenn es sich bestätigt, dass die Gravitation der Körper zu einander auf irgend eine Weise durch die Temperatur modificirt wird, welch neuer Stoff zum Nachdenken über das Verhältniss zwischen den Himmelskörpern und ihren relativen Temperaturen!"

[3]) Ann. de chim. et de phys. XLI (2), p. 319, 1836.

[4]) Pogg. Ann. XIX, S. 514 und XXI, S. 163, 1830.

[5]) Compt. rend. X, p. 397; Pogg. Ann. LI, S. 130, 1840.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

zeugung, dass alle bisherigen Erklärungen des Leidenfrost'schen Phänomens ungenügend seien. Boutigny machte viele neue und interessante Beobachtungen und erweiterte die Kenntniss der hierher gehörigen Erscheinungen bedeutend. Er zeigte, dass das Leidenfrost'sche Phänomen ausser bei dem Wasser noch bei vielen anderen Flüssigkeiten und zum Theil bei viel niedereren Temperaturen als bei jenem eintritt [1]). Bei Wasser betrug die betreffende Temperatur 200°, bei Alkohol nur 134°, bei schwefliger Säure nur 100° und bei Aether sogar nur 61°. Die schweflige Säure selbst hielt sich dabei auf einer Temperatur von — 10,5° C., so dass Boutigny mit ihrer Hülfe Wasser im glühenden Platintiegel zum Gefrieren bringen konnte. Auch auf Flüssigkeiten statt auf heissen Metallen konnte die Erscheinung hervorgebracht werden, so mit Schwefeläther auf Wasser, Quecksilber oder Brennöl, wenn dieselben nur bis 54° C. erhitzt wurden. Boutigny glaubte bei der Erklärung aller seiner Beobachtungen mit den bekannten drei Aggregatzuständen der Materie nicht auskommen zu können und für den Leidenfrost'schen Tropfen einen vierten annehmen zu müssen, den er als état sphéroidal bezeichnete. Dieser vierte Aggregatzustand sollte zwischen dem festen und dem flüssigen liegen, sollte sich durch eine kräftigere Abstossungskraft auf die Entfernung hin, sowie durch das Vermögen auszeichnen, die Wärme vollständig zu reflectiren, und sollte dadurch eine besondere Widerstandskraft gegen äussere Einwirkungen in den Körpern erzeugen. „Mit Hülfe des folgenden Experiments, schrieb Boutigny im Jahre 1849 [2]), hoffe ich feststellen zu können, dass die Körper im sphäroidalen Zustande durch eine couche de matière begrenzt sind, von welcher die Molecüle so verbunden sind, dass man sie mit einer festen, durchsichtigen Umhüllung von einer unendlich dünnen Dicke und einer sehr grossen Elasticität vergleichen kann“ [3]). Als sicheren Beweis für diese Ansicht betrachtete er dabei die Beobachtung, dass Wasser, Alkohol und andere Flüssigkeiten auf einem glühenden, spiralig gewundenen Platindraht in Tropfen liegen blieben, während die Flüssigkeiten bei gewöhnlicher Temperatur durchfielen. H. Buff aber wies diesen Beweisgrund durch die andere Beobachtung zurück, dass Wasser auch bei gewöhnlicher Temperatur auf den Maschen von Flor liegen bleibt.

Die Physiker behielten danach den ganz zweckmässig gewählten

---

[1]) Ann. de chim. et de phys. (3) IX, p. 350. Auch Compt. rend. seit 1840 in vielen Abhandlungen, endlich gesammelt in dem Werke Études sur le corps à l'état sphéroidal, 3. Ausg., Paris 1857.

P. H. Boutigny, 1798—1884, Apotheker in Evreux, dann Chemiker in England.

[2]) Compt. rend. XXIX, p. 473, 1849.

[3]) Ibid. L, p. 675, 1860, verwahrt sich Boutigny noch nachdrücklich gegen den Ausdruck „sphäroidaler Zustand der Flüssigkeiten“, da die Materie in diesem Zustande eben keine Flüssigkeit mehr sei.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Namen des sphäroidalen Zustandes bei, während für die Vorstellung desselben als eines besonderen Aggregatzustandes sich ausser Boutigny selbst kaum noch ein Anhänger fand. Man hielt es für das Wahrscheinlichste, dass der Tropfen im sphäroidalen Zustande auf seinem eigenen Dampfe ruhe, dass dadurch die unmittelbare Berührung und damit auch die unmittelbare Wärmeleitung sowie die Adhäsion zwischen dem Tropfen und seiner Grundlage ausgeschlossen sei und dass danach die Cohäsion der Flüssigkeit frei wirkend die Tropfengestalt erzeugen könne. Um den Zwischenraum zwischen Tropfen und Unterlage auch direct nachzuweisen, leitete Poggendorff[1]) den galvanischen Strom durch den Tiegel und die Flüssigkeit und fand, dass der Strom unterbrochen wurde, wenn die Flüssigkeit in den sphäroidalen Zustand gerieth; V. Pierre constatirte wenigstens, dass der Stromwiderstand in diesem Falle eine enorme Höhe erreiche. Tyndall[2]) aber machte die Lücke zwischen dem Tiegel und dem Tropfen direct sichtbar, indem er einen Tintentropfen auf der convexen Fläche eines Tiegels in den sphäroidalen Zustand versetzte und dann zwischen Tiegel und Tropfen einen glühenden Platindraht hindurch leuchten liess. Dass trotzdem die geringe Wärmeleitung zwischen Tropfen und Unterlage noch immer ziemlich räthselhaft und gar Manches in der Erscheinung des sphäroidalen Zustandes noch zweifelhaft und unbestimmt sei, das blieb auch weiterhin nicht unklar, aber der mangelnde Erfolg liess das Interesse nach und nach erlahmen, und seit den sechziger Jahren ist kaum noch Nennenswerthes auf diesem Gebiete geschehen[3]).

---

[1]) Pogg. Ann. LII, S. 539, 1841.

[2]) Phil. Mag. (4) X, p. 350, 1855. Buff, der gegen einen Abstand des Tropfens vom Tiegel war und die Gestalt desselben nur aus der verminderten Adhäsion erklären wollte, hatte Poggendorff's Beobachtung aus der Kleinheit der Berührungsfläche zwischen Tiegel und Tropfen erklärt. Ch. Cl. Person aber schrieb schon 1842 (Compt. rend. XV, p. 492; Pogg. Ann. LVII, S. 292): „Ich habe eine Vorrichtung erdacht, mittelst welcher man zwischen der Fläche und der Flüssigkeit hindurchsehen kann. Der Zwischenraum ist kein sehr bestimmter Bruch von dem Millimeter. Man gewahrt, dass er zu- oder abnimmt, je nach dem die Temperatur der Fläche höher oder niedriger ist“ (S. 293). Jos. Berger (Lehrer in Frankfurt a. M.) giebt 1863 nach sehr umfassenden Experimentaluntersuchungen (Pogg. Ann. CXIX, S. 594) folgende Definition: „Ein Körper im sphäroidalen Zustande ist ein solcher (verdampfender oder gasentwickelnder) Körper, dem die Wärme durch seinen eigenen Dampf (oder Gas) zugeleitet wird.... Die Wärmezufuhr ist deshalb eine beschränkte, die Verdampfung nur oberflächlich, ein eigentliches Kochen darum unmöglich.... Der sphäroidale Zustand hört auf, sobald die Spannkraft des Dampfes nicht mehr hinreicht, um eine unmittelbare Berührung und Wärmeleitung zwischen dem sphäroidalisirenden und sphäroidalisirten Körper zu hindern“ (S. 636).

[3]) Der sphäroidale Zustand diente, obgleich selbst noch nicht erklärt, wieder zur Erklärung anderer räthselhafter Erscheinungen, also doch zur Anknüpfung seltener beobachteter Vorgänge an bekanntere. Das Eintreten von Dampfkesselexplosionen, die Erscheinung, dass man die Hand ohne Schaden

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Die bis hierher erwähnten thermischen Untersuchungen hatten von Speculationen über das Wesen der Wärme in den Körpern mehr oder weniger abgesehen und waren auch durch die eigene Entwickelung nicht zu solchen gedrängt worden. Anders aber war dies bei allen den Arbeiten, die sich mit den mechanischen Wirkungen der Wärme und vor Allem mit der Bestimmung des mechanischen Aequivalents der Wärme beschäftigten. Gleich die ersten Entdecker des mechanischen Wärmeäquivalents waren sich darüber klar, dass dasjenige, was unbegrenzt in mechanische Arbeit sich umsetzen lasse, unmöglich ein Stoff sein, sondern nur selbst als eine Bewegungserscheinung gefasst werden könne, dass man also die Carnot'sche Vorstellung von der Kraft der Wärme als der eines Stromes mit bestimmtem Gefälle aufgeben und den Uebergang der Wärme aus einem Körper in einen anderen nur als eine Mittheilung von Bewegung auffassen müsse. Mit diesem Schlusse war aber nur das Fundament für die Theorie der Wärme gegeben, die Aufrichtung des Gebäudes selbst blieb noch zu thun. Selbst wenn anerkannt war, dass die Wärme eine Bewegungserscheinung sei, so war doch immer noch zu bestimmen, was in dem erwärmten Körper sich bewege, der in ihm enthaltene Aether, oder die Theile der ponderablen Materie selbst, und von welcher Art diese Bewegungen seien. Diese Aufgaben blieben auch nach der Entdeckung des mechanischen Aequivalents der Wärme in voller Schwierigkeit bestehen, und darin lagen die Ursachen, dass die neuere Wärmetheorie sich doch nur langsam entwickelte.

Mit der speciellen Construction der Wärmetheorie hatte sich Mayer wenig beschäftigt, hier war Joule bei seiner Begrenzung auf das engere Gebiet entschieden weiter thätig. Wie schon bemerkt, war der Letztere in seiner Arbeit „über die erwärmenden Wirkungen der Magnetoelektricität" zu der Ueberzeugung gekommen, dass die durch einen elektrischen Strom entwickelte Wärme nicht von einem Theile des Apparates in den anderen nur übertragen, sondern in dem betreffenden Theile des Stromleiters wirklich erzeugt werde. In einem Anhange [1]) zu dieser Arbeit ging er dann so weit, zu behaupten, dass die bei chemischen Verbindungen entwickelte Wärme durch „die beim Zusammensturz der Atome aufgewandte Kraft" bestimmt werde, dass die latente Wärme mit einer aufgewundenen Uhrfeder verglichen werden könne und dass Wasserstoff und Sauerstoff, wenn sie im flüssigen Zustande zusammengebracht werden könnten, jedenfalls bei ihrer Verbindung weniger Wärme entwickeln würden, als bei einer Verbindung im gasförmigen Zustande, weil die Atome im

---

in geschmolzene Metalle tauchen kann u. A., brachte man nun in glücklicher Weise mit dem sphäroidalen Zustande in Verbindung.

[1]) Das mechanische Wärmeäquivalent, S. 38 bis 40.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

ersteren Falle „bei der Verbindung einen geringeren Raum zu durchfallen hätten“. Wieder in einem Anhange zu einer folgenden Abhandlung über die „Wärmeentwickelung bei der Elektrolyse des Wassers“ [1]) erklärt er die Schmelzwärme für die mechanische Kraft, welche erforderlich ist, den Zusammenhang der Theilchen im festen Zustande, und die Verdampfungswärme als äquivalent der Kraft, welche erforderlich ist, den Zusammenhang der Theile im flüssigen Zustande und zugleich den Druck der Atmosphäre zu überwinden. Um dann, wie er sagt, eine Theorie der Wärme aufzustellen, natürlicher als die Undulationshypothese, knüpft er an Faraday's Hypothese an, wonach alle Atome von gleichen Elektricitätsmengen umgeben sind, und denkt sich, dass alle diese Elektricitätsatmosphären mit sehr grossen Geschwindigkeiten um ihre respectiven Atome rotiren. Das Moment der Atmosphären entspricht dann der Wärmemenge, die Geschwindigkeit des äusseren Umfanges der Temperatur. Dieselbe Anschauung vertritt Joule auch noch in der Abhandlung „über die Temperaturveränderungen durch Verdünnung und Verdichtung der Luft“, nur fügt er da hinzu, dass zur Erklärung der strahlenden Wärme noch die Annahme nöthig sei, dass die rotirenden Elektricitätsatmosphären die Fähigkeiten besässen, in dem Aether je nach den Umständen in grösserem oder geringerem Grade isochrone Wellenbewegungen zu erregen. Zugleich macht er auf die Unmöglichkeit aufmerksam, die Theorie der Dampfmaschinen, wie sie Carnot und Clapeyron ausgebildet, beizubehalten, „weil sie zu dem Schlusse führt, dass bei unzweckmässiger Einrichtung des Apparates lebendige Kraft zerstört werden könne“. Nicht der Fall der Wärme vom wärmeren zum kälteren Körper könne Arbeit leisten und ebenso könne nicht die im Condensator frei werdende Wärme der dem Kessel vom Herde mitgetheilten gleich sein; vielmehr müsse die erstere geringer sein als die letztere, und zwar im genauen Verhältniss zu dem Aequivalent der entwickelten mechanischen Kraft.

Diese Anschauung Joule's vom Wesen der Wärme, die er auch noch in der erwähnten grossen Abhandlung von 1850 wiederholte, versuchte Rankine von 1850 an in mehreren grossen Abhandlungen vollständiger aus- und mathematisch durchzubilden [2]). Nach ihm besteht jedes materielle Atom aus einem Kerne oder einem centralen, physischen Punkte, umgeben von einer elastischen Atmosphäre, welche durch anziehende Kräfte, die gegen das Centrum gerichtet sind, in ihrer Lage gehalten wird. Ob

[1]) Mem. of the Lit. and Phil. Soc. of Manchester (2) VII, p. 87. Der Anhang ist datirt vom 20. Februar 1844. Das mechanische Wärmeäquivalent, S. 53 bis 55.

[2]) Edinburgh Trans. XX, p. 147 (gelesen am 4. Februar 1850), p. 425 (gelesen am 15. December 1851), p. 565 (gelesen am 17. Januar 1853), 1853.

dabei der Kern oder physische Centralpunkt nur aus Atmosphärenmaterie in höchst condensirtem Zustande oder aus einem von der Atmosphäre verschiedenen Stoffe besteht, bleibt ausdrücklich unbestimmt. Der Aggregatzustand eines Körpers hängt von dem Verhältniss der elastischen Kraft seiner Atomatmosphären zur Wechselwirkung seiner Atome selbst ab. Die elastische Kraft der Wärme entsteht durch Rotationen oder durch Vibrationen der elastischen Atmosphären der Atome, und die Wärmemenge eines Körpers ist die lebendige Kraft dieser Rotationen und Vibrationen. Die Temperatur aber ist eine Function von dem Quotienten des Quadrates der Revolutionsgeschwindigkeit und der Elasticität der Atomatmosphären. Um diese Theorie der Wärme noch mit der des Lichtes und der strahlenden Wärme zu verbinden, muss angenommen werden, dass das Mittel, in welchem die letzteren sich fortpflanzen, aus Atomkernen besteht, die unabhängig oder fast unabhängig von ihren Atmosphären vibriren. Die Absorption von Licht und Wärme ist dann der Uebergang der Bewegung von den Atomkernen zu ihren Atmosphären, und die Emission geschieht durch die umgekehrte Uebertragung. Auf Grund dieser Hypothesen behandelt Rankine danach das Verhältniss zwischen Wärme und mechanischer Arbeit, die latente Wärme, die Gesetze der thermodynamischen Maschinen u. s. w.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Joule selbst aber, den Rankine in seiner Abhandlung mit Davy zusammen als Begründer seiner Theorie anführt [1]), machte gleich darauf in einer Abhandlung „Einige Bemerkungen über die Wärme und die Constitution der elastischen Flüssigkeiten" [2]) vom Jahre 1851 eine ganz entschiedene Wendung. Er verliess darin, wenigstens für die Wärmetheorie der Gase, die Annahme von Rotationen der Molecüle gänzlich und blieb nun auch jeder Hypothese über die Aetheratmosphären derselben fern; nicht darum, wie er sagt, weil die darauf gebauten Theorien nicht mit den Erscheinungen übereinstimmten, sondern nur der grösseren Einfachheit der folgenden Theorie wegen. Nach dieser ist die Wärme der elastischen Flüssigkeiten bedingt durch die gradlinig fortschreitende Bewegung ihrer Atome, die mit grossen Geschwindigkeiten nach allen Richtungen hin den Raum durchfliegen, und die Temperatur eines Gases ist der lebendigen Kraft dieser Bewegung seiner Moleküle proportional. Joule führte diese Hypothese auf Herapath [3]) zurück, that aber selbst sogleich einige kühne und erfolgreiche

[1]) Edinb. Trans. XX, p. 148.

[2]) Mem. of the Manch. Lit. and Phil. Soc., November 1851; auch Phil. Mag. (3) XIV p. 211, 1887; Das mech. Wärmeäquivalent, S. 120.

[3]) Annals of philosophy I, 1821; auch Mathematical physics 1847. Daniel Bernoulli hatte schon in seiner Hydrodynamica, Strassburg 1738, sect. X, p. 200, ähnliche Anschauungen, wenn auch ohne weit gehende

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Schritte in dieser rein mechanischen Wärmetheorie der Gase weiter. „Denken wir uns, sagt er, ein Gefäss von der Grösse und Gestalt eines Würfels von einem Fuss Seite mit Wasserstoffgas gefüllt, welches bei $60^0$ Temperatur und 30 Zoll Barometerdruck 36,927 Gran wiegen wird. Denken wir uns ferner obige Gasmenge in drei gleiche und beliebig kleine elastische Theilchen getheilt, deren jedes 12,309 Gran wiegt; und ferner, dass jedes dieser Theilchen zwischen den gegenüberliegenden Seiten eines Würfels schwinge .... es soll nun die Geschwindigkeit ermittelt werden, mit der jedes Theilchen sich bewegen muss, um dem Atmosphärendruck von 14 831 712 Gran auf jeder Seite des Würfels das Gleichgewicht zu halten. Es ist bekannt, dass ein Körper, der sich mit einer Geschwindigkeit von $32^1/_6$ Fuss per Secunde bewegt, wenn man ihm eine Secunde lang einen Druck gleich seinem eigenen Gewicht entgegensetzt, zur Ruhe gelangt und dass er, wenn der Druck noch eine Secunde länger anhält, eine Geschwindigkeit von $32^1/_6$ Fuss im entgegengesetzten Sinne annimmt. Bei dieser Geschwindigkeit wird jedes Theilchen von 12,309 Gran in je zwei Secunden $32^1/_6$ mal gegen jede Seite des Würfels anprallen; der dadurch ausgeübte Druck beträgt $12,309 \,.\, 32^1/_6 = 395,938$ Gran. Folglich erhalten wir, da bekanntlich der Druck dem Quadrate der Geschwindigkeit der Theilchen proportional ist, um einen Druck von 14 831 712 Gran auszuüben, die Geschwindigkeit $v = \sqrt{\frac{14831712}{395,938}} \cdot 32\frac{1}{6} = 6225$ Fuss per Secunde.“ Joule bemerkt, dass die Entwickelung dieselbe bleibt, in wie viel Theile man auch die Gasmasse in dem Würfel zerlegt denken mag; die gefundene Zahl 6225 muss danach auch die Geschwindigkeit der Atome des Wasserstoffs bei $60^0$ F. angeben. Da nun bekannt ist, dass der Druck einer elastischen Flüssigkeit bei $60^0$ zu dem bei $32^0$ sich wie 519 zu 461 verhält, so müssen die Geschwindigkeiten der Wasserstoffatome bei $60^0$ und $32^0$ sich wie $\sqrt{519}$ zu $\sqrt{461}$ verhalten, woraus die letztere Geschwindigkeit zu 6055 Fuss pro Secunde folgt. Joule führt für seine neue Wärmetheorie besonders an, dass aus ihr das Mariotte'sche Gesetz leicht und natürlich als Folgerung sich ergiebt. Ebenso leitet er leicht aus der Proportionalität von absoluter Temperatur und lebendiger Kraft der Gastheilchen und damit des Gasdrucks die Temperatur

Entwickelung derselben ausgesprochen. „Man denke sich ... ein cylindrisches, vertical stehendes Gefäss mit einem beweglichen Deckel darauf, auf welchem ein Gewicht ruht; das Gefäss enthalte sehr kleine Molecüle, welche sich mit der grössten Geschwindigkeit nach allen Richtungen bewegen: auf diese Weise bilden die Molecüle, indem sie gegen den Deckel anstossen und letzteren durch ihre beständig wiederholten Stösse tragen, ein elastisches Fluidum, welches sich ausdehnt, wenn das Gewicht entfernt oder verringert wird, und welches bei Vermehrung des Gewichtes verdichtet wird... Ein solches Fluidum ... wollen wir der Luft substituiren, und auf diese Weise einige Eigenschaften, welche bereits an der Luft entdeckt sind, erklären und andere noch nicht genug untersuchte erläutern.“

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

des absoluten Nullpunktes zu 491° F. unter dem Gefrierpunkte des Wassers ab. Endlich bestimmte er noch aus seiner neuen Theorie die specifische Wärme des Wasserstoffs und danach auch die der übrigen Gase, wobei sich freilich zeigte, dass die berechneten Werthe gegen die von Delaroche und Bérard durch Messungen erhaltenen alle zu klein waren.

So war durch Joule sogar die kinetische Theorie der Gase schon begründet, doch dauerte es noch längere Jahre, ehe man sich allgemeiner mit der Ausbildung dieser Theorie zu beschäftigen anfing. Vor der Hand empfand man es als nächstes Bedürfniss, nachdem die Carnot'sche Vorstellung vom Wärmestoff und seinem Gefälle unmöglich geworden, die Leistung mechanischer Arbeit durch die Wärme in der Gesetzmässigkeit ihrer Wirkungen nach der neueren Wärmetheorie abzuleiten. In Carnot's Theorie der thermischen Kreisprocesse lagen zwei Sätze über die Umwandlung von Wärme in Arbeit verborgen. Zuerst das Gesetz, nach welchem eine bestimmte Wärmemenge mit bestimmtem Wärmegefälle unter allen Umständen dieselbe Arbeit zu leisten im Stande ist, und dann der nicht minder wichtige Satz, dass nur bei umkehrbaren Kreisprocessen die producirte Arbeit auch der wirksam gewesenen Wärmemenge ihr vormaliges Gefälle wieder zu ertheilen, d. h. die bestimmte Wärmemenge von der erreichten niederen Temperatur auf ihre frühere höhere wieder zu erheben vermag. Der erste Satz betrifft die Constanz der Energie, ihn hatten Mayer, Joule u. A. festgestellt. Der zweite Satz geht auf die Aequivalenz der Verwandlungen der Energie, ihn hat vor allen Clausius constatirt und genau formulirt und ihn von dem ersteren als den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie unterschieden. Der Carnot'sche Beweis des Satzes ruhte auf der Vorstellung von einem Wärmestrome, Clausius aber machte schon 1850 in seiner ersten Arbeit „über die bewegende Kraft der Wärme“ [1]) darauf aufmerksam, dass man auch in der neueren Wärmetheorie den Satz beibehalten könne, wenn man nur den, auch nach dieser Theorie axiomatischen Satz annähme, dass Wärme nicht von selbst aus einem Körper von niederer Temperatur in einen solchen von höherer Temperatur übergehen könne.

Clausius ging davon aus, dass die neue Wärmetheorie nicht mehr eine Erzeugung von Arbeit durch eine Aenderung in der Vertheilung der Wärme (wie Carnot sich das vorgestellt) annehmen könne, sondern einen directen Verbrauch von Wärme constatiren müsse.

---

[1]) Pogg. Ann. LXXIX, S. 368 und 500, 1850. Rudolph Julius Emmanuel Clausius (2. Januar 1822 Cöslin — 24. August 1888 Bonn), 1850 Lehrer an der Königl. Artillerie- und Ingenieurschule in Berlin, 1857 Professor der Physik am Polytechnicum in Zürich, dann in Würzburg und seit 1869 in Bonn.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Holtzmann habe auch in seiner Abhandlung („Ueber die Wärme und Elasticität der Dämpfe“) von 1845 die Sache scheinbar von diesem Gesichtspunkte aus betrachtet, sei aber doch stillschweigend wieder zur Annahme einer Constanz der Quantität der Wärme zurückgekommen. Klarer habe W. Thomson gesehen, als er bei seiner Darstellung von Carnot's Theorie [1]) den Verbrauch von Wärme für sicher und zugleich für unvereinbar mit Carnot's Anschauung erklärt habe. Wenn freilich Thomson dann weiter behaupte, dass man beim Verlassen des Carnot'schen Fundamentes auf unzählige Schwierigkeiten stosse, welche ohne fernere experimentelle Untersuchungen und ohne einen vollständigen Neubau der Wärmetheorie unüberwindlich seien [2]), so müsse dem entgegengehalten werden, dass man einerseits vor solchen Schwierigkeiten nicht zurückschrecken dürfe und dass man andererseits auch nicht genöthigt sei, Carnot's Sätze ganz aufzugeben, sondern nur gezwungen, an Carnot's Vorstellungsweise Einiges zu ändern [3]). Anzunehmen sei als erster Satz der Wärmetheorie, „dass in allen Fällen, wo durch Wärme Arbeit entstehe, eine der erzeugten Arbeit proportionale Wärmemenge verbraucht werde, und dass umgekehrt durch den Verbrauch einer ebenso grossen Arbeit dieselbe Wärme erzeugt werde.“ Carnot's Satz, „dass der Erzeugung von Arbeit als Aequivalent ein blosser Uebergang von Wärme aus einem wärmeren in einen kälteren Körper entspreche, ohne dass die Quantität verringert werde“, müsse allerdings in seinem letzten Anhang vollständig fallen, dagegen könne der Satz selbst seinem Hauptinhalte nach fortbestehen. Denn wenn auch der Uebergang von Wärme mit dem Verbrauche derselben eigentlich nichts zu thun habe, so sei es doch möglich, dass ein Uebergang mit dem Verbrauche immer gleichzeitig stattfinden müsse und dass dieser Uebergang auch zur Arbeit in einer bestimmten Relation stehe. Es bleibe zu untersuchen, ob eine solche Annahme ausser der Möglichkeit auch die Wahrscheinlichkeit für sich habe. Das sei aber in der That der Fall, denn es widerspreche durchaus dem sonstigen Verhalten der Wärme, dass man ohne eine andere Veränderung beliebig viel Wärme aus einem kälteren Körper in einen wärmeren schaffen könne, indem die Wärme überall das Bestreben zeige, vorkommende Temperaturdifferenzen so auszugleichen, dass sie aus dem wärmeren Körper in den kälteren übergehe. „Danach scheint es gerechtfertigt zu sein, den wesentlichen Theil der Carnot'schen Annahme beizubehalten und als zweiten Grundsatz neben dem früher aufgestellten zu gebrauchen“ [4]).

---

[1]) An account of Carnot's theory, Edinburgh Trans. XVI, p. 541, 1849.

[2]) Ibid. p. 545.

[3]) Pogg. Ann. LXXIX, S. 372.

[4]) Ibid. S. 503.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Gleich nach Clausius kam auch W. Thomson dazu, den Carnot'schen Satz mit den neuen Vorstellungen von der Wärme zu vereinigen und einen dem zweiten Hauptsatze der Wärmetheorie von Clausius entsprechenden Satz abzuleiten [1]). Noch allgemeiner ausgreifend als Clausius ging er dann gleich auch dazu über, alle die verschiedenen möglichen Formen der Energie nicht bloss ihrer Grösse, sondern auch ihrer Umwandlungsfähigkeit nach zu betrachten [2]). Er machte darauf aufmerksam, dass nicht alle Energieformen trotz gleicher Grösse auch von gleicher Umwandlungsfähigkeit seien und dass z. B. eine Transformation der Wärme unter Umständen überhaupt nicht mehr möglich sein könne. Als Grundlage dieser Betrachtungen nahm er anstatt der Carnot'schen Vorstellung vom Wärmegefälle das Axiom an: „Es ist unmöglich, mit Hülfe unbeseelter Körper irgend welche mechanische Leistung durch irgend eine Substanz zu erzielen, wenn ihre Temperatur niedriger ist, als die tiefste aller sie umgebenden Körper" [3]). Da nun bei allen in der Natur vorkommenden Transformationen von Energie immer ein Theil derselben in Wärme umgesetzt

---

[1]) On the Dynamical Theorie of Heat, Edinburgh Trans. XX, p. 261 (gel. am 17. März 1851), p. 281 (gel. am 21. April 1851), p. 475 (gel. am 15. December 1851). Die fünf Theile dieser Abhandlung sind für die mathematische Behandlung der neuen Wärmetheorie von fundamentalster Wichtigkeit.

[2]) On an Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy, Phil. Mag. (4) IV, p. 304, 1852.

[3]) „It is impossible, by means of inanimate material agency, to derive mechanical effect from any portion of matter by cooling it below the temperature of the coldest of the surrounding objects" (Edinb. Trans. XX, p. 265).

Maxwell illustrirt den Ausdruck „by means of inanimate material agency" und begrenzt dadurch den zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie in folgender Weise: „Derselbe ist unzweifelhaft richtig, so lange wir nur mit den Körpern in grösseren Massen zu thun haben und keine Macht besitzen, die einzelnen Molecüle, aus welchen die Masse besteht, wahrzunehmen und damit zu arbeiten. Wenn wir uns indessen ein Wesen denken, dessen Fähigkeiten so geschärft sind, dass es jedes Molecül bei dessen Bewegung verfolgen kann, so würde ein solches Wesen, dessen Eigenschaften aber immer noch wesentlich endlich sind, ebenso wie unsere eigenen, im Stande sein, das zu leisten, was uns gegenwärtig unmöglich ist. Wir haben nämlich gesehen, dass die in einem Gefäss mit Luft von überall gleichförmiger Temperatur befindlichen Molecüle sich keineswegs mit gleichförmigen Geschwindigkeiten bewegen, obgleich die mittlere Geschwindigkeit jeder grösseren Anzahl derselben, welche willkürlich ausgewählt ist, stets überall dieselbe ist. Wir wollen uns nun denken, dass ein Gefäss in zwei Theile, A und B, getheilt sei durch eine Scheidewand, in welcher sich ein kleines Loch befindet. Ein Wesen, welches die einzelnen Molecüle sehen kann, mag dann abwechselnd dieses Loch öffnen und schliessen, und zwar in der Weise, dass nur den rascher gehenden Molecülen gestattet ist, von A nach B überzugehen und nur den langsameren umgekehrt von B nach A. Dieses Wesen wird daher ohne Aufwand von Arbeit die Temperatur von B steigern und die von A erniedrigen im Widerspruch mit dem zweiten Hauptsatze der Thermodynamik." (Maxwell, Theorie der Wärme, übersetzt von

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

wird, so ist die allmälige Umwandlung aller Energieformen in Wärme und danach auch das allmälige Verschwinden aller thermischen Differenzen im Weltall als sicher vorauszusehen. W. Thomson bezeichnet diese Erscheinung als die Dissipation oder Zerstreuung der Energie und leitet aus ihr die allmälige Abnahme aller Wirkungsfähigkeit in der Natur bis zu Null und damit den vorher zu sehenden Eintritt des Endes aller Dinge ab.

Endlich gab noch Macquorne Rankine ebenfalls im Jahre 1851 [1]) einen neuen Beweis für den zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie, soweit derselbe sich auf thermo-dynamische Maschinen bezieht, von dem aber Clausius [2]) behauptete, dass er in gewissen und gerade sehr wichtigen Fällen mit Rankine's eigenen, an anderen Stellen ausgesprochenen Ansichten im Widerspruche stehe [3]).

F. Neesen, Braunschweig 1878, S. 374). Mir scheint indess, dass hier die Nutzbarmachung der Energie auch dem beseelten Wesen nicht ohne Arbeit gelingen könnte und dass ausserdem für unsere menschliche Naturwissenschaft diese Art der Deduction nicht anwendbar sei.

[1]) Edinburgh Trans. XX, p. 205 (gel. im April 1851); p. 425 folgt noch ein im Princip gleicher Beweis, „but the result is expressed in a more comprehensive form" (p. 439).

[2]) Die mechanische Wärmetheorie I, S. 357, Braunschweig 1876.

[3]) W. Thomson sagt am Schlusse seines Beweises des zweiten Hauptsatzes: „It is with no wish to claim priority that I make these statements, as the merit of first establishing the proposition upon correct principles is entirely due to Clausius . . . I may be allowed to add, that I have given the demonstration as it occurred to me before I knew that Clausius had either enunciated or demonstrated the proposition." (Edinb. Trans. XX, p. 266.) Aehnlich in Bezug auf Clausius sprach sich Rankine aus: „Carnot was the first to assert the law, that the ratio of the maximum mechanical effect, to the whole heat expended in an expansive machine, is a function solely of the two temperatures at which the heat is respectively received and emitted, and is independent of the nature of the working substance. . . . The merit of combining Carnot's Law, as it is termed, with that of the convertibility of heat and power, belongs to Mr. Clausius and Professor William Thomson; and in the shape into which they have brought it, it may be stated thus: The max. proportion of heat converted into expansive power by any machine, is a function solely of the temperature at which heat is received and emitted by working substance; which function, for each pair of temperatures, is the same for all substances in nature. — This law is laid down by Mr. Clausius, as it originally had been by Carnot, as an independent axiom; and I had first doubts as to the soundness of the reasoning by which he maintained it. Having stated those doubts to Professor Thomson, I am indebted to him for having induced me to investigate the subject thoroughly; for although I have not yet seen his paper, nor become acquainted with the method by which he proves Carnot's law, I have received from him a statement of some of his more important results." (Edinb. Trans. XX, p. 205—206.) William Thomson wurde im Juni 1824 zu Belfast geboren, wo sein Vater Lehrer der Mathematik war. Er studirte in Cambridge und wurde schon 1846 Professor der Physik in Glasgow. Seine mathematischen und physikalischen Abhandlungen erschienen gesammelt unter dem Titel: „Mathematical and physical papers, collected from

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860

Drei Jahre nach diesen, im Jahre 1854[1]), fasste Clausius selbst den zweiten Hauptsatz in eine bestimmtere, mathematische Form; aber erst geraume Zeit später zog auch er aus demselben die weiteren und letzten Consequenzen und kam dadurch zu ähnlichen Vorstellungen, wie sie Thomson mit dem Namen der Dissipation der Energie bezeichnet hatte[2]). Schon aus den Carnot'schen Vorstellungen geht hervor, dass nicht das ganze Gefälle der Wärme bis zum absoluten Nullpunkt, sondern nur bis zur Temperatur des kältesten, zur Verfügung stehenden Körpers zur Production von Arbeit verwendet werden kann. Nach dem Axiom von Clausius über die Unmöglichkeit des Uebergangs von Wärme aus einem kälteren nach einem wärmeren Körper ohne weitere Compensation bleibt diese Thatsache auch für die Transformationsfähigkeit der Wärme in Arbeit bestehen. Die Grösse der transformirbaren Energie ist hier nicht gleich der absoluten Grösse der Energie allein, sie ist nicht nur der Wärme direct (wenn wir alle Energie in Wärme ausdrücken), sondern auch der absoluten Temperatur des kühleren Körpers umgekehrt proportional; diese transformirbare Energie oder der Verwandlungsinhalt eines Körpers lässt sich also durch $\frac{Q}{T}$ darstellen, wo $Q$ die Wärme und $T$ die absolute Temperatur bezeichnen. Clausius bewies nun, dass für einen umkehrbaren Kreisprocess die Formel $\int \frac{dQ}{T} = o$ [3]) und für einen nicht umkehrbaren Kreisprocess die Formel $\int \frac{dQ}{T} < o$ [4]) gelten muss, wenn man den Uebergang von

---

different scientific periodicals from may 1841, to the present time", 2 Bde., London 1882 und 1884. Ausser auf dem Gebiete der Wärme war er auch auf dem Gebiete der Elektricität in hervorragendster Weise thätig. William John Macquorne Rankine (5. Juli 1820 Edinburgh — 24. December 1872 Glasgow), Civilingenieur, dann Professor der Ingenieurwissenschaften und Mechanik in Glasgow.

[1]) Ueber eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie, Pogg. Ann. XCIII, S. 481.

[2]) Pogg. Ann. CXVI, 1859, CXXI, 1864, CXXV, 1865.

[3]) Pogg. Ann. XCIII, S. 487, 1854. Clausius sagt hier (S. 488) von der ersten, früheren Form seines zweiten Hauptsatzes: „Bei der Ableitung dieses Satzes ist aber ein zu einfacher Process zu Grunde gelegt, bei dem nur zwei Körper vorkommen, welche Wärme verlieren oder empfangen, und es ist daher in ihm stillschweigend vorausgesetzt, dass die in Arbeit verwandelte Wärme aus einem derselben beiden Körper herstamme, zwischen denen auch der Wärmeübergang stattfindet. Indem auf diese Weise über die Temperatur der in Arbeit verwandelten Wärme im Voraus eine bestimmte Annahme gemacht ist, so ist dadurch der Einfluss, welchen eine Aenderung dieser Temperatur auf das Verhältniss der beiden Wärmemengen ausübt, verdeckt, und der Satz ist also in der obigen Form unvollständig."

[4]) Pogg. Ann. CXVI, S. 73, 1862. Clausius führt in dieser Abhandlung die Erweiterung seines Satzes mit den Worten ein: „Die innere Arbeit ist

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

höherer zu niederer Temperatur als positiv rechnet. Danach wird also nur bei einem umkehrbaren Kreisprocesse nichts an verwandlungsfähiger Energie verloren, durch einen nicht umkehrbaren Kreisprocess aber wird sie unter allen Umständen vermindert. Indem dann Clausius die nicht mehr transformationsfähige Energie des Körpers mit dem neuen Namen Entropie bezeichnet, kommt er dazu, den zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie in der auf die letzten Consequenzen hindeutenden Form auszusprechen: „Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu“ [1]).

---

meistens so wenig bekannt, und mit einer anderen ebenfalls unbekannten Grösse in solcher Weise verbunden, dass man sich bei ihrer Behandlung einigermaassen von Wahrscheinlichkeitsgründen leiten lassen muss. . . . Da ich nun in meiner früheren Veröffentlichung alles Hypothetische zu vermeiden wünschte, so schloss ich die innere Arbeit ganz davon aus, was dadurch geschehen konnte, dass ich mich auf Kreisprocesse beschränkte. . . . Bei einem solchen Vorgange heben sich nämlich die inneren Arbeitsgrössen . . . gegenseitig auf“ (S. 73 bis 74). . . . „Mit der Veröffentlichung des übrigen Theils meines Gesetzes habe ich bis jetzt gezögert, weil er zu einer Folgerung führt, welche von den bisher verbreiteten Vorstellungen über die in den Körpern enthaltene Wärme beträchtlich abweicht, und ich es deshalb für wünschenswerth hielt, ihn noch weiter zu prüfen. Da ich mich jedoch im Verlauf der Jahre mehr und mehr davon überzeugt habe, dass man jenen Vorstellungen, welche zum Theil mehr auf Gewohnheit, als auf wissenschaftlicher Begründung beruhen, kein grosses Gewicht beilegen muss, so glaube ich mein früheres Bedenken endlich aufgeben und den vollständigen Satz von der Aequivalenz der Verwandlungen und die damit zusammenhängenden Sätze dem wissenschaftlichen Publicum vorlegen zu dürfen“ (S. 74). „Diese Vorgänge (durch welche eine Wärme Arbeit leisten kann) lassen sich immer darauf zurückführen, dass durch die Wärme die Anordnung der Bestandtheile eines Körpers geändert wird. . . . Um dieses mathematisch ausdrücken zu können, wollen wir den Grad der Zertheilung des Körpers durch eine neu einzuführende Grösse darstellen, welche wir die Disgregation des Körpers nennen wollen, und mit deren Hülfe wir die Wirkung der Wärme einfach dahin definiren können, dass sie die Disgregation zu vermehren sucht“ (S. 78 bis 79). Indem dann Clausius für die Disgregation einen mathematischen Ausdruck gewinnt, gelingt ihm der ganz allgemeine Beweis seines Satzes. Am Schlusse der Abhandlung zeigt er, dass eine unendlich grosse Aenderung der Disgregation dazu gehören würde, um einen Körper bis zum absoluten Nullpunkte abzukühlen, und dass also eine solche Abkühlung nicht möglich ist.

[1]) Ueber die Bildung des Wortes Entropie sagt Clausius in der Abhandlung, wo er den Ausdruck einführt (Pogg. Ann. CXXV, S. 390, 1865): „Das Wort Entropie habe ich absichtlich dem Worte Energie möglichst ähnlich gebildet, denn die beiden Grössen, welche durch diese Worte benannt werden sollen, sind ihren physikalischen Bedeutungen nach einander so nahe verwandt, dass eine gewisse Gleichartigkeit in der Benennung mir gerechtfertigt zu sein scheint.“ Am Schlusse der Abhandlung (S. 398) charakterisirt er selbst seinen zweiten Hauptsatz in folgender Weise: „Der zweite Hauptsatz in der

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Der Carnot-Clausius'sche Satz hat wechselvolle Schicksale erlitten, und selbst heute ist sein endgültiges Loos noch nicht festgestellt oder wenigstens nicht allgemein gesichert. Für Kreisprocesse zwar, in der Form $\int \frac{dQ}{T} = o$, ist er kaum angefochten worden, und man hat sich nur bemüht, seine Ableitung nach den eigenen Ansichten zu verbessern. Rankine, der, wie schon erwähnt, den Satz auf eigene Weise ableitete, gab der Function $\frac{dQ}{T}$ zuerst einen eigenen Namen, den der thermodynamischen Function. Zeuner verglich in seinem berühmten Werke: „Grundzüge der mechanischen Wärmetheorie" die ohne Compensation transformirbare Energie mit der potentiellen Energie eines aufgehängten Gewichtes und gab danach jener Function in seiner Ableitung des zweiten Hauptsatzes den Namen Wärmegewicht. v. Oettingen[1], der den zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie aus dem ersten abzuleiten versuchte, schlug wieder für jene Function einen anderen Namen, den der Adiabate, vor und fand die Clausius'sche Bezeichnungsweise unter allen am wenigsten geeignet. Er besonders sprach sich auch gegen die Clausius'sche Anwendung des Satzes auf die nicht umkehrbaren Kreisprocesse und gegen die weiter gehenden Folgerungen desselben aus. „Die soeben angeführten Sätze, sagte er im Jahre 1875, von Thomson und Clausius halte ich für bestreitbar, und glaube nachweisen zu können, dass von den angeblich positiven Elementen der von Clausius definirten Entropie sich viele als gleich Null erweisen. Wenn hiermit noch keine Widerlegung jener Thesen gegeben, so dürften dieselben immerhin nicht unbestritten dastehen, auch ganz abgesehen davon, ob man sich, wie Thomson zu thun scheint, in Organismen die Möglichkeit einer Verletzung physikalischer Gesetze offen erhält oder nicht"[2].

---

Gestalt, welche ich ihm gegeben habe, sagt aus, dass alle in der Natur vorkommenden Verwandlungen in einem gewissen Sinne, welchen ich als den positiven angenommen habe, von selbst, d. h. ohne Compensation, geschehen können, dass sie aber im entgegengesetzten, also negativen Sinne nur in der Weise stattfinden können, dass sie durch gleichzeitig stattfindende positive Verwandlungen compensirt werden. Die Anwendung dieses Satzes auf das gesammte Weltall führt zu einem Schlusse, auf den zuerst W. Thomson aufmerksam gemacht hat. Wenn nämlich bei allen im Weltall vorkommenden Zustandsänderungen die Verwandlungen von einem bestimmten Sinne diejenigen vom entgegengesetzten Sinne an Grösse übertreffen, so muss der Gesammtzustand des Weltalls sich immer mehr in jenem ersten Sinne ändern und sich somit ohne Unterlass einem Grenzzustande nähern."

[1]) Pogg. Ann., Ergänzungsband VII, S. 83, 1875. A. J. v. Oettingen, geb. 1836, Professor der Physik in Dorpat.

[2]) Ibid., S. 85.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

In der That schien manchen Physikern der zweite Hauptsatz der Wärmetheorie in einem solchen Gegensatz zu dem ersten zu stehen, dass er das eben erst anerkannte Princip von der Erhaltung der Energie wenigstens theilweise wieder aufhob. Setzte man sich dann auch mit Recht über die weiteren Consequenzen des zweiten Hauptsatzes hinweg, indem man betonte, dass die Grösse der vorhandenen nutzbaren Energie, wie die ihres Verbrauchs gänzlich unbekannt seien und dass darum auch nach jenen Anschauungen das Ende der Dinge über den Kreis unserer Vorstellung weit hinausliege, so hielten doch viele Physiker die Wirkungsmöglichkeit oder die Transformationsfähigkeit an den Begriff der Energie für absolut gebunden und eine nicht mehr umwandelbare Energie dünkte ihnen überhaupt keine Energie mehr zu sein. Um dem gegenüber doch den Satz von der Constanz der Energie in aller Strenge zu retten, mussten sie, da die Beweisführung des Satzes nicht gut angreifbar war, das Fundament derselben, das Clausius'sche Axiom, als unsicher nachweisen. In der That sind manche Angriffe direct gegen diesen Satz gerichtet worden. Rankine wandte 1852 [1]) gegen das Axiom, dass Wärme von einem kälteren auf einen wärmeren Körper nicht ohne weitere Compensation übertragen werden könne, mit ziemlichem Anschein der Richtigkeit ein, dass mit Hülfe eines Brennspiegels die Wärme sich wohl concentriren und so ohne irgend einen weiteren Verbrauch von Energie von einer niederen auf eine höhere Temperatur bringen lasse. Clausius aber setzte dem entgegen, dass man durch keinen Brennspiegel im Brennpunkte eine Temperatur erzeugen könne, welche höher sei als die Temperatur des Körpers, von welchem die Wärmestrahlen ausgesandt wurden [2]), wenigstens unter der Bedingung, dass die Wärmestrahlung eines Körpers nicht nur von seiner Beschaffenheit und Temperatur, sondern auch von dem Medium abhängt, durch welches die Strahlung geschieht, so dass die Ausstrahlung dem Quadrate der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Strahlen in dem Mittel indirect, oder dem Quadrate des Brechungsexponenten dieses Mittels direct proportional ist. Theodor Wand [3]) machte neben anderen mehr mechanischen Bedenken auch darauf aufmerksam, dass Wärme und Licht in den Pflanzen die Kohlensäure zersetzen und den Kohlenstoff aufspeichern, durch dessen Verbrennung dann eine viel höhere Temperatur hervorgebracht werden könne, als in den chemisch wirkenden Sonnenstrahlen

---

[1]) Philosophical Magazine (4) IV, S. 358: On the reconcentration of the mechanical energy of the universe.

[2]) Ueber die Concentration von Licht- und Wärmestrahlen und die Grenzen ihrer Wirkung, Pogg. Ann. CXXI, S. 1, 1864; auch „Mechanische Wärmetheorie", Braunschweig 1876, S. 314.

[3]) Kritische Darstellung des zweiten Satzes der mechanischen Wärmetheorie von Th. Wand, Carl's Repertorium für Experimentalphysik IV, S. 231 und 369, 1868.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

selbst enthalten gewesen. Dem aber lässt sich nach R. Rühlmann[1]) erwidern, dass doch die Sonnenstrahlen nicht in der Atmosphäre, an deren Temperatur Wand bei dem Strahlen aussendenden Körper zu denken scheint, sondern in der Sonne entspringen, und dass deren Temperatur doch viel höher als jede durch eine Verbrennung auf Erden zu erzeugende angenommen werden muss.

Der berühmte Wärmetheoretiker Hirn[2]) beschrieb in seinem Werke Exposition analytique et experimentale de la chaleur vom Jahre 1862 eine sehr interessante thermodynamische Maschine, mittelst deren ein Gas von 0⁰ bis auf 120⁰ und weiter erwärmt werden könne, ohne dass ein Körper von höherer Temperatur als 100⁰ zur Verfügung zu stehen und ohne dass ein Kraftverlust einzutreten brauche. Clausius machte dem gegenüber darauf aufmerksam, dass hier das zu erwärmende Gas eine Doppelrolle spiele und dass der Wärmestrom, der von dem warmen Körper auf das kalte Gas übergehe, die Compensation bilde, die zur Erhöhung der Temperatur desselben Gases über diejenige des warmen Körpers hinaus nach seinem Axiom nöthig sei. Hirn bezeichnete dann auch den durch seine Maschine bedingten Einwand nur als einen scheinbaren und erklärte seine Uebereinstimmung mit Clausius[3]). Ganz in derselben Weise wie hier beseitigte Clausius auch einen Einwurf von Tait, der gegen das Clausius'sche Axiom anführte, dass man mit Hülfe einer Thermosäule, deren Löthstellen auf resp. 0⁰ und 100⁰ erhalten würden, einen dünnen Draht leicht glühend machen und also leicht über 100⁰ erhitzen könne[4]). Später hat Tait noch einen anderen Angriff gewagt. Maxwell[5]) hatte, wie schon angedeutet, für seine mathematische Behandlung der Theorie der Gase angenommen, dass auch in einem Gase von ganz gleicher Temperatur doch die Molecüle verschiedene lebendige Kraft besitzen und die Temperatur nur dem Mittelwerth aller dieser verschiedenen Kräfte entsprechen könnte; er hatte dabei auch bemerkt, dass danach, wenigstens für Wesen von übermenschlicher Ordnung, welche diese Molecüle zu sondern vermöchten, der zweite Hauptsatz wohl ungültig werden könnte. Tait[6]) versuchte diese Vorstellung zu vermenschlichen, indem er behauptete, dass jene Sonderung der Atome auch ohne Dämonen von selbst durch die Bewegung der Gas-

---

[1]) Handbuch der mechanischen Wärmetheorie I, S. 389, Braunschweig 1875.

[2]) G. Ad. Hirn, geb. 1815 in Logelbach b. Colmar, Bes. einer Spinnerei das.

[3]) S. Clausius: Die mechanische Wärmetheorie I, S. 373—378.

[4]) Phil. Mag. (4) XLIII, p. 328; XLIV, p. 240; Pogg. Ann. CXLV, S. 496, 1872; Pogg. Ann. CXLVI, S. 308.

[5]) Theory of Heat, London 1871; übersetzt von Neesen, Braunschweig 1878, II, S. 374.

[6]) Lectures on some recent advances in Physical Science, second edition, London 1876; übersetzt von Wertheim, Braunschweig 1877, S. 101.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

molecüle eintreten könne. Clausius[1]) gab das zu, bemerkte aber, dass ein solches Moment der Sonderung doch sehr vorübergehend, von derselben Ordnung wie die Grösse der Molecüle und damit für uns unwahrnehmbar sein müsse. Einen schwer zu begegnenden Einwurf, weil er mehr als alle vorigen das dunkle Gebiet der Molecularkräfte streifte, machte Tolver Preston[2]) gegen Clausius geltend. Ein überall geschlossener Cylinder soll in der Mitte durch einen beweglichen Stempel aus Pfeifenthon, Graphit etc. in zwei gleiche Theile getheilt sein, von denen der eine mit Sauerstoff, der andere mit Wasserstoff angefüllt sind. Dann wird, weil der Wasserstoff in stärkerem Maasse als der Sauerstoff durch den Stempel diffundirt, dieser gegen die Wasserstoffseite hingetrieben werden. Somit wird dann ohne jede äussere Compensation nicht bloss nutzbare Arbeit geleistet, sondern es wird auch der Wasserstofftheil sich abkühlen und der Sauerstofftheil sich erwärmen. Clausius[3]) aber hebt dagegen, wie uns scheint, mit Recht hervor, dass auch in dem Nebeneinandersein verschiedener Gase ein Vorrath von nutzbarer Energie liegt, dass den gemischten Gasen eine grössere Disgregation zuzuschreiben ist als den ungemischten, und dass in dieser Vergrösserung der Disgregation bei der Mischung die Compensation für die producirten mechanischen Arbeiten und Temperaturdifferenzen liegt.

Vermochte so Clausius die Richtigkeit seines fundamentalen Satzes siegreich zu behaupten und verstummten auch immer mehr die Angriffe auf den zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie, so liess doch schon die Thatsache jener Angriffe die axiomatische Natur jenes fundamentalen Satzes in etwas zweifelhaftem Lichte erscheinen. Dazu kam noch ein Anderes. Wenn die Wärme, wie die neuere Theorie annimmt, nur eine Art der Bewegung, wenn sie also eine rein mechanische Erscheinung ist, so müssen auch alle ihre Eigenschaften aus den bekannten mechanischen Axiomen abzuleiten sein. Da die Temperatur eines Körpers nur der Bewegung seiner Molecüle proportional, so muss die Möglichkeit eines Wärmeüberganges von einem Körper zum anderen auch ohne besonderes thermisches Axiom nur nach den Eigenthümlichkeiten der Bewegung beurtheilt werden können. Es ist auch leicht einzusehen, dass für die Energie der reinen Bewegung, wenn man alle potentiellen Energien einmal nicht mehr vorhanden denkt, der zweite Hauptsatz, die Lehre von den nutzbaren Energien, ebenso wie für die Wärmetheorie, gültig bleibt. Die absolute Grösse der Energie eines beweglichen Körpers nämlich ist allerdings dem Quadrat der absoluten Geschwindig-

---

[1]) Die mechanische Behandlung der Elektricität, Braunschweig 1879, S. 317.

[2]) Nature XVII, p. 202, 1878. Zweifel an der Geltung des zweiten Hauptsatzes bei Vorgängen der Diffusion hat in neuester Zeit auch R. Pictet (Tageblatt der 60. Versammlung deutscher Naturforscher, S. 231, Wiesbaden 1888) ausgesprochen.

[3]) Die mechanische Behandlung der Elektricität, Braunschweig 1879, S. 318.

keit desselben proportional, aber die in Wirklichkeit wirksame Energie hängt nicht von seiner absoluten, sondern von der relativen Bewegung, von den vorhandenen Bewegungsdifferenzen ab. Wenn in einem isolirten, materiellen System die Bewegungen der einzelnen Theile sich so ausgeglichen haben, dass alle Geschwindigkeiten gleich gross und gleichgerichtet sind, so ist trotz einer beliebigen Grösse der absoluten Energie die nutzbare Energie des Systems doch gleich Null. Für die mechanische Wärmetheorie, die ja eine reine kinetische Wissenschaft sein soll, blieb es danach jedenfalls eine nicht abzuweisende Forderung, den zweiten Hauptsatz der Theorie auch ohne besonderes thermisches Axiom rein aus mechanischen Principien zu deduciren. Am ehesten begann mit dieser Ableitung L. Boltzmann in einer Arbeit „über die mechanische Bedeutung des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie“ [1]) vom Jahre 1866; ihm folgte fünf Jahre später Clausius selbst [2]), der ganz zu den Boltzmann'schen Resultaten nur in etwas grösserer Allgemeinheit kam. Beide Ableitungen entsprachen den Operationen, durch welche man in der Mechanik das Princip der kleinsten Wirkung bestimmt. C. Szily erklärte dann im Jahre 1872 geradezu, dass der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie nichts weiter sei, als eine directe Anwendung des Hamilton'schen Princips auf die Wärmelehre, und leitete auch aus diesem Princip den zweiten Hauptsatz direct ab [3]).

Umwandlung der Wärmetheorie. c. 1840 bis c 1860.

Mochten nun auch diese Arbeiten an vollkommener Klarheit und Sicherheit der Ableitungen und der dabei gemachten Annahmen Manches

---

[1]) Sitzungsber. d. Wiener Akademie LIII, 2. Abth., S. 195, 1866. L. Boltzmann (geb. am 14. Februar 1844, Professor der Physik in Graz) sagt am Schluss seines Beweises des zweiten Hauptsatzes: „Man sieht leicht, dass unsere Schlüsse von der Bedeutung der darin vorkommenden Grössen in der Wärmelehre vollkommen unabhängig sind und daher zugleich ein Theorem der reinen Mechanik beweisen, welches dem zweiten Hauptsatze gerade in derselben Weise entspricht, wie das Princip der lebendigen Kräfte dem ersten; es ist dies, wie ein Blick in unsere Betrachtung lehrt, das Princip der kleinsten Wirkung.“ (S. 217.)

[2]) Pogg. Ann. CXLII, S. 433, 1871.

[3]) Pogg. Ann. CXLV, S. 295, 1872; CXLIX, S. 74, 1873. Clausius erklärt sich mit dieser directen Identificirung der beiden Sätze doch nicht ganz einverstanden. Er sagt gleich darauf (Pogg. Ann. CL, S. 106, 1873): „Herr Szily, welcher schon in einem früheren Aufsatze angenommen hatte, dass dasjenige, was wir in der Thermodynamik den zweiten Hauptsatz nennen, in der Dynamik nichts Anderes sei, als das Hamilton'sche Princip, hat in einem neueren Aufsatze denselben Schluss abermals wiederholt. Ich hoffe aber, dass die Auseinandersetzungen meines gegenwärtigen Aufsatzes ihn erkennen lassen werden, dass zwischen der Hamilton'schen Gleichung und derjenigen Gleichung, welche in der Thermodynamik zur Erklärung des zweiten Hauptsatzes angewendet wird, ein wesentlicher Unterschied besteht.“ Szily hat denn auch in einem späteren Aufsatze (Pogg. Ann., Ergänzungsbd. VII, S. 151, 1875) den zweiten

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis 1860.

zu wünschen übrig lassen, so zeigten sie doch offenbar die Möglichkeit, den zweiten Hauptsatz auch ohne die speciellen Voraussetzungen der Wärmetheorie rein mechanisch zu begründen. Damit aber trat der zweite Hauptsatz ganz aus dem engeren Gebiete der Wärmetheorie heraus und wurde zu einem Princip der Transformation aller Energie, also zu einem Princip der gesammten Physik. Sein Entwickelungsgang war damit dem des ersten Hauptsatzes, der Lehre von der Constanz der Energie, ganz parallel, und der Satz selbst war eine nothwendige Ergänzung des Energieprincips im ganzen Gebiete der Physik geworden. In dieser Richtung sind dann seit der Mitte der siebziger Jahre viele Physiker weiter thätig gewesen; auch Helmholtz, der seit seiner berühmten Abhandlung von 1847 diese Themata nicht mehr berührt hatte, wandte sich seit den achtziger Jahren wieder solchen Untersuchungen zu. Im Jahre 1882 [1]) versuchte er die Principien des zweiten Hauptsatzes auch auf chemische Vorgänge anzuwenden, bald darauf beschäftigte er sich mit der rein mechanischen Betrachtung aller dem zweiten Hauptsatze unterworfenen Vorgänge [2]), und im Verlauf dieser Untersuchungen kam er auch zu jener schon früher citirten, weit reichenden Würdigung des Maupertuis-Hamilton'schen Princips der kleinsten Wirkung [3]).

---

Hauptsatz ohne jede weitere Hypothese aus dem ersten Hauptsatze abzuleiten versucht. Koloman v. Szily, geb. am 29. Juni 1838, Professor am Polytechnicum in Budapest.

[1]) Die Thermodynamik chemischer Vorgänge, Sitzungsber. d. Berl. Akademie 1882, S. 22; auch Wissenschaftliche Abhandlungen II, S. 958. In dieser Abhandlung führt Helmholtz die Benennungen der freien und der gebundenen Energie ein. „Ein Wärmevorrath ist bekanntlich nach dem von Hern Clausius präciser gefassten Carnot'schen Gesetze nicht unbeschränkt in andere Arbeitsäquivalente umwandelbar; wir können das immer nur dadurch und auch dann nur theilweise erreichen, dass wir den nicht verwandelten Rest der Wärme in einen Körper niederer Temperatur übergehen lassen. . . . Wenn wir nun bedenken, dass die chemischen Kräfte nicht bloss Wärme, sondern auch andere Formen der Energie hervorbringen können, letzteres sogar ohne dass irgend eine der Grösse der Leistung entsprechende Aenderung der Temperatur in den zusammenwirkenden Körpern einzutreten braucht, wie z. B. bei den Arbeitsleistungen der galvanischen Batterien: so scheint es mir nicht fraglich, dass auch bei den chemischen Vorgängen die Scheidung zwischen dem freier Verwandlung in andere Arbeitsformen fähigen Theile ihrer Verwandtschaftskräfte und dem nur als Wärme erzeugbaren Theile vorgenommen werden muss. Ich werde mir also erlauben, diese beiden Theile der Energie im Folgenden kurzweg als die freie und die gebundene Energie zu bezeichnen.“ (S. 958 und 959.)

[2]) Journal für reine und angewandte Mathematik, XCVII, S. 111 und 317. 1884; Sitzungsber. d. Berl. Akademie 1884, S. 159, 311, 755 und 1197.

[3]) Siehe S. 242 d. B. Ganz allgemeine Betrachtungen ohne mathematische Begründungen knüpfte auch L. Pfaundler (Pogg. Ann., Jubelband, S. 182, 1874) an den zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie an, indem er sich

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Ebenso viele Schwierigkeiten mindestens als die Ersetzung des Clausius'schen thermischen Axioms für den zweiten Hauptsatz durch ein entsprechendes mechanisches bereitete den Mechanikern der Wärmetheorie die mechanische Fassung des Begriffs der Temperatur. Es war auch keineswegs erst in der letzten Zeit, dass man sich über die Dunkelheiten, die im Begriff der Temperatur liegen, klar geworden war. Schon die Anhänger des Wärmestoffs hatten bemerkt, dass unsere Thermometergrade, die nach willkürlich gesetztem Nullpunkte bestimmt werden, für absolute Messungen der Wärmemenge nicht ohne Weiteres brauchbar sind, und sie hatten auch den absoluten Nullpunkt der Thermometer schon zu bestimmen versucht. Crawford setzte denselben in seinem berühmten Werke On animal heat auf $-821^0$ C. fest. Dalton versuchte den absoluten Nullpunkt aus den Mischungswärmen verschiedener Stoffe mit Hülfe der Wärmecapacitäten derselben zu bestimmen, kam aber dabei zu sehr von einander abweichenden Resultaten [1]). Bessere Erfolge erzielte man mit der Benutzung des thermischen Ausdehnungscoëfficienten der Gase. Da bei der Erwärmung eines bestimmten Gasvolumens von $0^0$ bis auf $266{,}66^0$ C. das ursprüngliche Volumen auf das Doppelte anwächst [2]), so lässt sich annehmen, dass zur Bildung eines Volumens $266{,}66^0$ Wärme nöthig sind, und dass ein Gas durch eine Abkühlung von $0^0$ bis auf $-266{,}66^0$ sein Volumen ganz verliert, d. h. auf den Rauminhalt 0 reducirt werden würde. Weil aber

zu zeigen bemüht, dass durch ein gewisses Bestreben zur Erhaltung der extremen Formen das Wachsthum der Entropie des Weltalls verlangsamt wird. „Aus dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie, sagt er am Schlusse des Aufsatzes, hat man die Consequenz gezogen, dass die Weltuhr auch einmal ablaufen müsse. Ist das treibende Gewicht einer Uhr zu Boden gesunken, so ist alle Arbeit in Wärme verwandelt, die nicht verwendbar ist, um das Gewicht wieder zu heben. Die Entropie (des Uhrwerks) hat ihr Maximum erreicht.“ Bei günstigem Zusammenstoss der Zähne mit dem Ankerhaken wird aber mit dem Sinken des Pendels das Gewicht gehoben, und diese negative Verwandlung compensirt einen Theil der positiven Verwandlung, die Arbeitsleistung compensirt einen Theil des Arbeitsverbrauchs des fallenden Gewichtes. Die Zunahme der Entropie wird also durch eine Reihe von entgegengesetzten Veränderungen verlangsamt. Diesem Steigen und Fallen des Pendels entspricht dann in der Natur der Pflanzen- und der Thierprocess. (S. 198.) G. Helm (Professor am Polytechnicum in Dresden) gebraucht umgekehrt ein gewisses Bestreben der Energie, um den zweiten Hauptsatz und damit den Begriff der Entropie von jedem besonderen thermischen Axiom frei zu machen. Er setzt an die Stelle des letzteren den Satz: „Jede Energieform hat das Bestreben, von Stellen, in welchen sie in höherer Intensität vorhanden ist, zu Stellen von niederer Intensität überzugehen.“ Im Allgemeinen findet auch bei jedem Uebergange Umformung statt; nur die Wärme kann von höherer zu niederer Intensität übergehen, ohne dass überhaupt Umformung eintritt. (Die Lehre von der Energie, Leipzig 1887, S. 62.)

[1]) Manch. Mem. V, p. 595, 1802; Gilbert's Annalen XII, S. 316, 1802.

[2]) Der Ausdehnungscoëfficient der Gase ist nach Gay-Lussac zu 0,00375 angenommen.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

in einem Volumen 0 auch kein Wärmestoff mehr vorhanden sein kann, so muss die letztere Temperatur von — 266,66° den absoluten Nullpunkt der Temperatur angeben. Diesen Ausführungen von Désormes und Clément [1]) schlossen sich Laplace [2]) und mit ihm die meisten Physiker der damaligen Zeit an [3]). Die neuere Wärmetheorie konnte diese Bestimmungsweise einfach aufnehmen, und sie hatte dabei den entschiedenen Vortheil, dass sie ihren Messungen nicht wie vorher die Vorstellung eines auf 0 reducirten Volumens, sondern nur die einer auf 0 reducirten Geschwindigkeit zu Grunde zu legen brauchte. Dafür aber traten in der mechanischen Wärmetheorie die Schwierigkeiten, die in dem Begriffe der Temperatur überhaupt lagen, viel klarer als früher hervor. Die alte Wärmetheorie hatte sich um das eigentliche Wesen der Temperatur wenig gekümmert und dieselbe nur aus ihren Wirkungen beurtheilt. Für eine Mechanik der Wärme aber war es unerlässlich, die Temperatur auch mechanisch zu definiren und das Wesen derselben aus den Eigenschaften der Bewegung abzuleiten [4]).

Aus dem Grundsatze, dass die Temperatur zweier Körper gleich ist, wenn kein Wärmeübergang zwischen ihnen stattfindet, dürfte man zunächst schliessen, dass die Temperatur der lebendigen Kraft der Molecüle der Körper proportional sei. Da aber bei der Temperatur nur äussere Wirkungen in Betracht kommen, so wird diese Definition auf die lebendige Kraft zu beschränken sein, die zu äusserer Arbeit verfügbar ist und nicht durch innere Arbeit absorbirt wird; sie wird also direct nur für solche Stoffe, bei denen keine innere Arbeit anzunehmen ist, also nur für vollkommene Gase gelten. Für alle anderen Körper wird man die Temperatur nur derjenigen lebendigen Kraft proportional setzen können, die der freien Wärmebewegung seiner Molecüle eigen ist. Da aber einerseits vollkommene Gase gar nicht existiren und andererseits bei allen übrigen Körpern das Verhältniss der äusseren und inneren Arbeit ein zweifelhaftes ist, so war jene directe Definition der Temperatur ebensowohl nicht ohne Schwierigkeiten für die Thermometrie, wie sie für die analytische Entwickelung der Wärmetheorie unbequem und weitläufig war. Man hat darum schon früh sich mit indirecten Definitionen der Temperatur begnügt, die aber dafür in einem nahen Zusammenhange mit den vorhandenen mathematischen Entwickelungen standen. Der Erste, der dies that, war W. Thomson [5]).

---

[1]) Journal de physique LXXXIX, p. 324, 1819.

[2]) Mécanique céleste V, p. 92.

[3]) Vergl. Gehler's physikalisches Wörterbuch, 2. Ausgabe, X, S. 115—126.

[4]) Siehe Boltzmann, Sitzungsber. d. Wiener Akad. LIII, 2. Abth., S. 195, 1866. Boltzmann beginnt seine Abhandlung über die mechanische Bedeutung des zweiten Hauptsatzes mit dem Bekenntniss: „Zuerst ist uns hierzu die Bestimmung eines Hauptbegriffs der gesammten Wärmelehre nöthig, der bis jetzt noch nicht mit Schärfe und Einstimmigkeit definirt wurde, nämlich der Begriff der Temperatur.“

[5]) On an absolute thermometric scale founded on Carnot's

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860

Clapeyron hatte aus Carnot's Betrachtungen für umkehrbare Kreisprocesse die Formel $\frac{dQ}{dv}\cdot\frac{dT}{dp}-\frac{dQ}{dp}\cdot\frac{dT}{dv}=C$ abgeleitet [1]), wo $C$ eine reine, für alle Naturkräfte identische Temperaturfunction bedeutet, deren reciproker Werth der Arbeit gleich ist, die eine Wärmeeinheit leisten kann, wenn sie in eine um einen Grad niedrigere Temperatur übergeht [2]). Die Form dieser Temperaturfunction, die bei Clapeyron unbestimmt bleibt, hat zuerst Helmholtz in seiner Abhandlung von 1847 gegeben [3]). Für Gase wird nämlich jene Formel $C = v\frac{dQ}{dv} - p\frac{dQ}{dp}$, und indem Helmholtz diese mit der anderen von Holtzmann (Ueber die Wärme und Elasticität, Mannheim 1845) gegebenen $\frac{pv}{a} = v\frac{dQ}{dv} - p\frac{dQ}{dp}$ verglich, fand er $C = \frac{pv}{a}$ oder $C = \frac{k(1+\alpha t)}{a}$, wo $k$ eine Constante, $a$ das mechanische Aequivalent der Wärmeeinheit und $\alpha$ den Ausdehnungscoëfficienten der Gase bedeutet [4]). Drückt man hier noch den Factor $1+\alpha t$ durch die aus dem Ausdehnungscoëfficienten der Gase nach alter Definition berechnete absolute Temperatur $T$ aus, so sieht man, dass $C = \frac{k\alpha T}{a}$, oder auch $C = \frac{KT}{a}$, dass also die Temperaturfunction $C$ der absoluten Temperatur proportional ist.

Auf diese Thatsache gründete nun umgekehrt Thomson seine Definition der Temperatur. Joule [5]) hatte in einem Briefe vom 9. December 1848 bemerkt, dass die absolute Temperatur einfach dem Producte aus der Temperaturfunction $C$ und dem mechanischen Aequivalente der Wärmeeinheit, also die oben auftretende Constante $K$ der

theory of the motive power of heat and calculated from Regnault's observations on steam; Proceedings of Cambridge Phil. Soc. June 5, 1848.

[1]) Pogg. Ann. LIX, S. 574.

[2]) Clapeyron sagt da, wo er die Function einführt (Pogg. Ann. LIX, S. 463): „Die Function $C$ ist, wie man sieht, von hoher Wichtigkeit; sie ist unabhängig von der Natur des Gases, und ist nur eine Function von der Temperatur; sie ist wesentlich positiv, und dient als Maass der Wirkungsgrösse, welche Wärme entwickeln kann."

[3]) Einzelne Werthe derselben für bestimmte Temperaturen hatte schon Clapeyron aus Dulong's Versuchen berechnet. (Pogg. Ann. LIX, S. 577.)

[4]) Ueber die Erhaltung der Kraft, Berlin 1847, S. 34—37; Wissensch. Abhandl. I, S. 37—40.

[5]) Thomson sagt (Edinb. Trans. XX, p. 279): „It was suggested to me by Mr. Joule, in a letter dated December 9, 1848, that the true value of $\mu\left(=\frac{1}{C}\right)$ might be „inversely of the temperatures from zero", and values for various temperatures calculated by means of the formel $\mu = J\frac{E}{1+Et}$ were given for comparison with those I had calculated from data regarding steam."

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Einheit gleich zu setzen sei. Thomson machte also darauf aufmerksam, dass die Temperaturfunction $C$, weil sie für alle Naturkörper identisch, sich besonders dazu eigne, als Temperaturmaass zu dienen, und schlug vor, indem er den reciproken Werth der Function $C$ als Carnot'sche Function bezeichnete, die absolute Temperatur als den Quotienten aus dem mechanischen Aequivalent der Wärmeeinheit und der Carnot'schen Function zu definiren. Diese absolute Temperatur liess sich dann auch so erklären, dass sie als diejenige Temperatur angesehen wurde, für welche bei einem unendlich kleinen Kreisprocess das Verhältniss der unendlich kleinen Temperaturerhöhung zur absoluten Temperatur dem Verhältniss aus der in Arbeit umgesetzten und der ganzen von dem heissen auf den kalten Körper übertragenen Wärmemenge einfach gleich zu setzen ist [1]). Sehr zahlreiche und sehr sorgfältige Untersuchungen über die Wärmewirkungen bewegter Flüssigkeiten [2]) zeigten dann auch, dass die nach diesen Definitionen berechneten Werthe der absoluten Temperatur mit den aus den Angaben eines Luftthermometers erhaltenen, so sehr als bei der Abweichung der Luft von der Natur eines vollkommenen Gases zu erwarten, übereinstimmten [3]).

Der Thomson'schen, indirecten Art, die Temperatur zu definiren, haben sich die Bearbeiter der analytischen Wärmetheorie mehr oder weniger direct angeschlossen. Clausius entwickelt den allgemeinsten Ausdruck des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie zuerst in der Form $\int \frac{dQ}{\tau} = o$, wo $\tau$ eine noch unbekannte Function der Temperatur bedeutet. Dann zeigt er, dass diese Temperaturfunction $\tau$ gleich dem Product aus der absoluten Temperatur $T$ und einer Constanten ist, und endlich setzt er $\tau$ einfach gleich $T$, weil bei dem Verhältnissbegriff Temperatur, wie die Formeln zeigen, der constante Factor beliebig bestimmt werden kann [4]). Aehnlich verfährt Zeuner in seinen „Grundzügen der mechanischen Wärmetheorie" [5]), der die Function $S$, die er als integrirenden Divisor von $dQ$ einführt und die sich

---

[1]) „Heat" by Sir William Thomson, Edinburgh 1880, p. 44.

[2]) Phil. Trans. 1853, p. 357; 1854, p. 321; Pogg. Ann. XCVII, S. 576.

[3]) Phil. Trans. 1854, p. 353. Eine Tafel über die absoluten Temperaturen verglichen mit den Angaben eines Luftthermometers von 0—300° C. zeigt: „The greatest discrepance between 0° and 100° C. amounts to less than $^1/_{20}$th of a degree and the discrepance at 300° C. is only four-tenths."

[4]) Die mechanische Wärmetheorie I, S. 112.

[5]) 2. Auflage, Leipzig 1866. Zeuner sagt (S. 75): „Wenn ich im Texte gleich von vornherein über die Form der Function $S$ eine bestimmte Annahme mache, nämlich die Hypothese voranstelle, dass $S$ die Temperatur selbst sein müsse, so geschieht das im Wesentlichen deshalb, um schon hier in den allgemeinen Betrachtungen eine bestimmte Definition des Temperaturmaasses zu gewinnen, und weil dadurch der Einblick in die folgenden Betrachtungen ganz wesentlich erleichtert wird." In der dritten Ausgabe seiner Schrift „Tech-

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

von der Carnot'schen Function $C$ nur durch einen constanten Factor unterscheidet, hypothetisch der absoluten Temperatur gleichsetzt, um durch die folgenden Deductionen diese Hypothese zu verificiren. Endlich hat auch Helmholtz[1]) bei seinen neuesten Arbeiten über die mechanischen Consequenzen des zweiten Hauptsatzes die Bedingungen untersucht, unter welchen die kinetische Energie der Molecüle die wesentlichen Eigenschaften der Temperatur besitzen kann. Er definirt die Temperatur als eine Function, welche 1) integrirender Nenner der Differentialgleichung $dQ = o$ ist, welche 2) für zwei Körper gleichen Betrag haben muss, wenn zwischen ihnen Wärmeaustausch nicht stattfinden soll, und welche 3) der Bedingung entspricht, dass, wenn zwei Körper mit einem dritten, sie auch unter sich im thermischen Gleichgewicht sind. Wenn in einem Punktsystem nur zwei verschiedene Gruppen von Bewegungen stattfinden, stationäre, deren Geschwindigkeit verschwindende Aenderungen erleidet, und cyklische, bei denen die Coordinaten der einzelnen Punkte sich nur wenig ändern, so kann man wirklich unter gewissen Bedingungen die aufgenommene oder abgegebene Wärme als die den cyklischen Bewegungen zugeführte oder entzogene Arbeit $dQ$ auffassen. Kommt nämlich nur eine cyklische Bewegung im Systeme vor (monocyklische Systeme) oder hängen alle cyklischen Bewegungen ausser von der Lage der Punkte nur noch von einer einzigen Function, z. B. einer Geschwindigkeit, ab (gefesselte polycyklische oder allgemeine monocyklische Systeme), so ist die kinetische Energie des Systems einer unter den integrirenden Nennern der Differentialgleichung $dQ = o$. Kann dann zwischen zwei oder mehreren monocyklischen Systemen kein Austausch kinetischer Energie physisch anders hergestellt werden, als durch Vereinigung derselben zu einem neuen monocyklischen Systeme, so entscheidet die Gleichheit jenes integrirenden Nenners darüber, ob im Falle einer solchen Koppelung kinetische Energie ausgetauscht und also die zweite und dritte jener Bedingungen erfüllt wird. Die Wärme eines Körpers kann also gedacht werden als die Energie der cyklischen Bewegungen eines monocyklischen Systems, und die Temperatur ist die kinetische Energie derselben.

Alle diese Untersuchungen über die rein mechanische Deutung der Wärmebegriffe, die wir hier gleich des Zusammenhangs wegen mit

---

nische Thermodynamik", Leipzig 1887 (I, S. 29 u. f.), vermeidet Zeuner jene Vornahme. Gustav Zeuner, geboren am 30. November 1828 in Chemnitz, 1853 bis 1857 Redacteur des „Civilingenieur", 1857 Professor der Mechanik und theoretischen Maschinenlehre in Zürich, 1865 Director des Polytechnicums in Zürich, 1871 Director der Bergakademie in Freiberg, seit 1875 Director des Polytechnicums in Dresden.

[1]) Sitzungsber. d. Berl. Akademie 1884, S. 159 und 311; Journal für reine und angewandte Mathematik XCVII, S. 111 und 317. Die folgenden Sätze nach G. Helm, Die Lehre von der Energie, Leipzig 1887.

Umwandlung der Wärmetheorie. c. 1840 bis c. 1860.

aufgenommen haben, gehören nicht bloss der Zeit, sondern auch ihrem Charakter nach ganz in die nächste Periode. Sie haben indessen hier für uns den Werth, dass sie besonders deutlich zeigen, wohin die Entwickelung der Wissenschaft drängte und zu welchem Ziele sie führen musste, nämlich zu einem weiteren Eindringen in das Wesen der Materie. So wie man die Wärme nur als eine Art der Bewegung und zwar der Molecularbewegung auffasste, so musste, je mehr man sich mit der Wärme beschäftigte, auch immer klarer werden, dass zu vollständig sicheren allgemeinen Resultaten auf diesem Gebiete nicht zu kommen wäre, bevor man nicht über die Constitution dessen, was sich bewegt, über die Constitution der Materie zu klareren Vorstellungen gelangt sei. Die vielen verschiedenen, sich widersprechenden Ansichten, die vielen Streitigkeiten über die Hauptsätze der Wärmetheorie, die entgegengesetzten Anschauungen über die Sicherheit der Ableitungen, die mannigfachen verschiedenen Beweise selbst, alles das liess erkennen, dass man mit der Entdeckung des mechanischen Aequivalents der Wärme, mit der neuen Anschauung vom Wesen der Wärme nicht zum Abschluss einer Neubildung, sondern erst zum Anfang derselben gekommen sei. Die Sicherheit der Physiker in Bezug auf die Entbehrlichkeit aller fundamentalen Untersuchungen über das Wesen der Materie begann danach immer mehr zu schwinden, und eine neue Revision wenigstens dieser Begriffe wurde immer unvermeidlicher. Ist die Wärme eine reine Translationsbewegung der Molecüle, oder kommen in ihr auch Rotationen vor? Wie unterscheiden sich die Wärmebewegungen in Gasen, Flüssigkeiten und festen Körpern; in wie weit werden sie durch die Molecularkräfte gestört, oder wie weit greift die innere Arbeit in den Stoffen in die Wärmebewegungen ein? Sind die Molecularkräfte nur attractive und reicht die lebendige Kraft der Wärmebewegung zur Erklärung der Elasticität etc. aus, oder muss man nun, nachdem nicht mehr dem Wärmestoff eine Repulsivkraft zugeschrieben werden kann, eine solche wieder der ponderablen Materie zulegen? Ja könnte man nicht gar die elementaren Molecularkräfte ganz eliminiren und die Naturerscheinungen aus den Bewegungen der kleinsten Theile der Materie erklären? Alle diese Fragen verlangten nach ihrer Lösung und zwangen auch die Experimentalphysiker, wieder auf Speculationen über das Wesen der Materie zurückzukommen. Dass diese den Zwang fühlten und ihm zu folgen sich anschickten, wurde immer sichtbarer, je mehr man sich dem Ende der sechziger Jahre näherte. Da man aber nicht zweifelhaft sein konnte, dass die Molecularkräfte bei festen Körpern am stärksten und bei Gasen am wenigsten wirksam sein würden, so sah man zuerst von der Behandlung der festen Körper und der Flüssigkeiten ab und bildete nur die mechanische Theorie der Gase aus. Den bewussten Anfang einer solchen

systematischen Durchbildung machte Clausius im Jahre 1857 mit seiner Abhandlung „über die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen“. Mit derselben treten wir ganz entschieden in die letzte Phase der Wärmetheorie und zugleich in die neueste Periode der Physik, mit ihr werden wir im nächsten Abschnitt unsere Betrachtung beginnen.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Noch bleiben uns einige Sätze nachzuholen, die fast direct nach Aufstellung der neuen Theorie der Wärme und meist fast gleichzeitig von W. Thomson, Clausius, Rankine u. A. abgeleitet wurden. Aus der Abweichung der Joule'schen Werthe für das mechanische Aequivalent der Wärmeeinheit von dem aus der specifischen Wärme der Luft erhaltenen schloss man leicht, dass die von Delaroche und Bérard herrührende Zahl 0,2669 für die specifische Wärme der Luft bei constantem Drucke zu gross sein müsse. Rankine berechnete im Jahre 1850 rückwärts aus dem Joule'schen Werthe des mechanischen Wärmeäquivalents jene specifische Wärme auf 0,2404 [1]), ein Resultat, das mit dem später von Regnault experimentell erhaltenen 0,2375 recht gut übereinstimmte. James Thomson hatte 1849 aus Clapeyron's Formeln den Satz abgeleitet, dass der Gefrierpunkt des Wassers vom Druck abhängig sein müsse [2]). W. Thomson [3]) bestätigte diesen Satz durch Versuche und zeigte allgemein, dass der Schmelzpunkt eines festen Körpers bei einer Vermehrung des Druckes sinkt, wenn der Körper im festen Zustande ein grösseres Volumen hat als im flüssigen, umgekehrt aber steigt, wenn das Verhältniss der Volumina das entgegengesetzte ist. Für den Gefrierpunkt des Wassers speciell fand er ein Sinken um 0,0135° F. für jeden Atmosphärendruck. Clausius schloss sich dem direct an und wies nach, dass auch aus seiner Auffassung des Carnot'schen Satzes die Abhängigkeit des Gefrierpunktes vom Druck folge [4]). Wichtig für die Theorie der Dampfmaschinen, wenn sie auch nicht ohne Anfechtung aufgenommen wurde, war die Folgerung, welche Rankine [5]) und

---

[1]) Edinburgh Trans. XX, p. 191, 1853, gelesen am 2. December 1850; Pogg. Ann. LXXXI, S. 175, 1850.

[2]) Edinburgh Trans. XVI, p. 575, 1849. James Thomson, älterer Bruder von W. Thomson, Civil-Ingenieur in Glasgow.

[3]) Exp. on the effect of pressure in lowering the freezing point of water, Phil. Mag. (3) XXXVII, p. 123, 1850; Pogg. Ann. LXXXI, S. 163.

[4]) Pogg. Ann. LXXXI, S. 168, 1850.

[5]) Edinburgh Transactions XX, p. 147, 1853 (gelesen am 4. Februar 1850). Rankine sagt: „Wenn ein gegebenes Gewicht gesättigten Dampfes in seiner Temperatur wächst und zu gleicher Zeit durch Compression im Maximum seiner Spannkraft erhalten wird, so ist die durch die Compression erzeugte Wärme grösser als diejenige, welche zur Erhöhung der Temperatur nöthig wäre, und ein Ueberschuss von Wärme wird abgegeben; auf der anderen Seite, wenn gesättigter Dampf sich ausdehnt und zu gleicher Zeit auf der Sättigungstemperatur erhalten wird, so ist die Wärme, welche durch die Ausdehnung ver-

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

Clausius [1]) gleichzeitig aus dem ersten Hauptsatze der Wärmetheorie zogen, dass nämlich vollständig gesättigter Wasserdampf, wenn er sich ausdehne, theilweise als flüssiges Wasser sich niederschlagen, wenn er aber comprimirt werde, in überhitzten Dampf übergehen müsse [2]). Wichtiger noch für die gesammte Thermotechnik war die neue Schätzung der Wirkungsfähigkeit der Dampfmaschinen, welche W. Thomson [3]), Rankine [4]) und Clausius [5]) bei ihren Untersuchungen des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie entwickelten, und die, allerdings schon in Carnot's Werk angelegt, der bis dahin herrschenden Theorie von Pambour doch ziemlich entgegengesetzt war. Nach Clausius ist das Maximum $W$ der Arbeit, welche von einer vollkommenen Dampfmaschine höchstens erhalten werden kann, durch die Formel

$$W = \frac{Q}{A} \cdot \frac{T_1 - T_0}{T_1}$$

bestimmt, wo $Q$ die gesammte verbrauchte Wärme, $A$ das mechanische Aequivalent der Wärme, $T_1$ die absolute Temperatur des heisseren und $T_0$ die des kälteren Körpers bezeichnen [6]). Aus dieser Formel ging die damals sehr überraschende Thatsache hervor, dass auch in der voll-

---

braucht wird, grösser als diejenige, welche durch das Sinken der Temperatur frei wird, und der Wärmeverlust muss von aussen ersetzt werden, sonst würde ein Theil des Dampfes sich condensiren müssen. um die zur Ausdehnung des Restes nöthige Wärme zu liefern.

[1]) Pogg. Ann. LXXIX, S. 391, 1850. Clausius fügt seiner Aufstellung hinzu: „Dieses Resultat ist freilich den vorher erwähnten, gewöhnlichen Vorstellungen gerade entgegengesetzt, doch glaube ich nicht, dass irgend eine experimentelle Erfahrung dagegen spricht."

[2]) W. Thomson bemerkt zu diesen Sätzen (Phil. Mag. (3) XXXVII, p. 387; Pogg. Ann. LXXXI, S. 477): Da man die Hand in den ausströmenden Dampf eines Dampfkessels halten kann, ohne sich zu verbrennen, so muss Rankine's Satz falsch sein, oder der Dampf muss beim Ausströmen Wärme aufnehmen. Schliesslich kommt er zu der Ueberzeugung, dass die zur Verhinderung der Verflüssigung nöthige Wärme durch die Reibung des Dampfes beim Ausströmen erzeugt wird. (Edinb. Trans. XX, p. 287—288.)

[3]) On the Dynamical Theory of Heat, Edinb. Trans. XX, p. 261.

[4]) Edinburgh Trans. XX, p. 147, 195 und 205; Phil. Trans. CXLIV, p. 115, 1854. Von dem umfassenden Werke „A manuel on the steam engine and other prime movers" (London und Glasgow, 1859) sagt Rühlmann (Handbuch der mech. Wärmetheorie, II, S. 961, 1885): „Gewisse Partien dieses Rankine'schen Werkes sind nach dem Urtheile maassgebender Fachleute noch nicht durch neuere Darstellungen übertroffen."

[5]) Anwendung der mechanischen Wärmetheorie auf die Dampfmaschine, Pogg. Ann. XCVII, S. 441 und 513, 1856. Die mechanische Wärmetheorie, S. 247.

[6]) Clausius führt den Beweis für diese Formel folgendermaassen (Pogg. Ann. XCVII, S. 453): Wir wollen annehmen, es seien $Q_1$ die Wärmemengen, welche der veränderliche Körper nach einander empfängt, sowie $T_1$ die Temperaturen, welche er bei der Aufnahme einer jeden Wärmemenge hat, und nur eine Temperatur $T_0$ sei übrig, bei welcher dem Körper noch eine Wärmemenge mitgetheilt oder entzogen wird, deren Grösse $Q_0$ unbekannt ist. Das Integral

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

kommensten Dampfmaschine nicht alle von derselben aufgenommene Wärme in Arbeit verwandelt werden kann, dass vielmehr unter den obwaltenden Verhältnissen, bei der bedeutenden Erhebung der Temperatur aller benutzbaren Körper über den absoluten Nullpunkt, der grösste Theil der Wärme unnutzbar von einem Theile der Maschine auf den anderen übertragen, oder auf innere Zustandsänderung des Körpers verwandt werden muss.

Diese scheinbar ungünstigen Ergebnisse, welche man über den Wirkungsgrad der Dampfmaschinen erhielt, regten zu Versuchen über die Construction anderer thermo-dynamischer Maschinen an. Aus der obigen Formel für die Maximalarbeit einer thermo-dynamischen Maschine ersah man, dass der Wirkungsgrad mit der Differenz der Temperaturen $T_1 - T_0$ bedeutend wächst. Da nun die Temperatur des Condensators $T_0$ nicht unter eine gewisse Grenze zu bringen war, so musste es wünschenswerth erscheinen, die Temperatur $T_1$ so viel wie möglich zu erhöhen. Dies schien für Luft eher möglich als für gesättigte Wasserdämpfe, und so brachte man den sogenannten calorischen oder Heissluftmaschinen nicht geringe Sympathien entgegen. Im Anfange der 50er Jahre erschienen eine Menge zum Theil recht günstiger Abhandlungen über die Leistungen und die Theorie der von Ericsson[1]) im Jahre 1850 erfundenen calorischen Maschine, und im Anfange der 60er Jahre, nachdem Ericsson eine verbesserte calo-

---

des zweiten Hauptsatzes $\int \frac{dQ}{T} = - N$ zerlege man dann in zwei Theile, von denen der eine sich über die bekannte Wärmemenge $Q_1$, der andere über die unbekannte $Q_0$ erstreckt, so ist, da $T_0$ einen bekannten Werth hat:

$$\int_0^{Q_1} \frac{dQ}{T} + \frac{Q_0}{T_0} = - N,$$

oder:

$$Q_0 = - T_0 \int_0^{Q_1} \frac{dQ}{T} - T_0 \,.\, N.$$

Da aber die gesammte Wärmemenge, welche in Frage kommt, gleich $Q_1 + Q_0$, so ist die gesammte Arbeit:

$$W = \frac{1}{A}(Q_1 + Q_0) \text{ oder } W = \frac{1}{A}\left(Q_1 - T_0 \int_0^{Q_1} \frac{dQ}{T} - T_0 \,.\, N\right).$$

Nehmen wir nun an, dass der betreffende Kreisprocess ein umkehrbarer ist und dass auch die Wärme $Q_1$ bei einer constanten Temperatur $T$ mitgetheilt wird, so ist $N = o$ und $\int_0^{Q_1} \frac{dQ}{T} = \frac{Q_1}{T_1}$, und danach kommt direct $W = \frac{Q_1}{A} \cdot \frac{T_1 - T_0}{T_1}$.

[1]) Heissluftmaschinen waren schon seit Anfang dieses Jahrhunderts von Niepce (1806), Cagniard Latour (1809), Montgolfier und Dayme (1816), Stirling (1827) und auch von Ericsson (1833) angegeben, aber auch wieder aufgegeben worden. Johann Ericsson (1803 Langbanshyttan in Schweden — 1889 New-York), führte 1836 die vervollkommnete Schiffsschraube ein, baute 1861 das Panzerschiff Monitor.

Umwandlung der Wärmetheorie, c. 1840 bis c. 1860.

rische Maschine beschrieben, wiederholte sich dieser Vorgang. Zuletzt aber zeigte sich doch, dass diese Maschinen theoretisch den Dampfmaschinen keineswegs überlegen waren und praktisch mit denselben nicht concurriren konnten [1]). Ein gleiches Schicksal schien der im Jahre 1860 von Lenoir [2]) erfundenen Gasmaschine bevorzustehen, doch errang sich diese nach ihrer Verbesserung durch Otto im Jahre 1865 ihrer praktischen Bequemlichkeit und Billigkeit wegen im Kleinbetriebe eine immer grössere Verbreitung.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

Das goldene Zeitalter der analytischen Mechanik war vorüber; als eine in sich abgeschlossene Wissenschaft war dieselbe in den neueren Lehrbüchern von Poisson (1. Aufl. 1811, 2. Aufl. 1833 u. s. w.), Duhamel (1845—1846) u. A. niedergelegt. Auch die synthetische Methode war der Mechanik schon wieder gesichert und bedurfte nur noch einer mehr schulgemässen systematischen Ausbildung. So kam es, dass nun die experimentelle, inductive Mechanik der mathematisch-deductiven gegenüber wieder mehr ins Gewicht fiel und dass man sich von dem eben mit Vorliebe behandelten Gebiete der Mechanik fester Körper ab und zur Mechanik flüssiger und gasförmiger Körper oder auch direct zu einer Mechanik der Molecüle hinwandte. Das aber bedingte unter den damaligen Umständen noch eine Vereinzelung der mechanischen Arbeiten, sowohl auf dem mathematischen als auf dem empirischen Gebiete. Die Untersuchungen der Mechaniker zeichneten sich in diesem Zeitraume nicht sowohl durch zusammenhängende aus der Mechanik selbst hervortretende Ideen, als vielmehr durch besondere Ziele aus, die sehr häufig durch andere physikalische, nicht eigentlich mechanische Interessen bedingt waren. Besonders gilt dies auch von den Arbeiten auf dem Gebiete der Molecularmechanik. Die Ausbildung einer Molecularphysik wurde immer allseitiger als ein

---

[1]) Clausius sagt in seiner Abhandlung von 1856 (Pogg. Ann. XCVII, S. 474) über die calorischen Maschinen: „Es ist somit leicht zu erkennen, was schon S. Carnot und nach ihm viele Autoren ausgesprochen haben, dass man, um die durch Wärme getriebenen Maschinen vortheilhaft einzurichten, hauptsächlich darauf bedacht sein muss, das Temperaturintervall $T_1 - T_0$ zu erweitern. So ist z. B. von den calorischen Maschinen nur dann zu erwarten, dass sie einen wesentlichen Vortheil vor den Dampfmaschinen erlangen, wenn es gelingt, sie bei bedeutend höheren Temperaturen arbeiten zu lassen als die Dampfmaschinen, bei welchen die Gefahr der Explosion die Anwendung zu hoher Temperaturen verbietet. Dasselbe lässt sich aber auch mit überhitztem Dampf erreichen, denn sobald der Dampf von der Flüssigkeit getrennt ist, kann man ihn ebenso gefahrlos noch weiter erhitzen wie ein permanentes Gas.“ Bekanntlich aber wurden auch den calorischen Maschinen gerade die hohen Temperaturen verderblich, indem sie einen sicheren Gang der Maschinen auf die Dauer unmöglich machten.

[2]) Patente auf Gasmaschinen nahmen 1858 die Italiener Barsanti und Matteucci und der Franzose Hugon, 1860 Lewis, 1866 Otto und Langen in Köln.

allgemeines Bedürfniss anerkannt; aber ohne leitende klare Ideen über einen möglichen Gang des Vordringens griff jeder Physiker da an, wo er, durch besondere Anlagen oder besondere äussere Umstände veranlasst, den meisten Erfolg erwartete.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

Der Begriff der Kraft führte fortwährend zur Auffindung neuer Räthsel. Mit dem Parallelogramm der Bewegungen, wie es Newton und Kant durch Annahme verschiedener relativer Bewegungen in verschiedenen relativen Räumen abgeleitet und zur Constatirung auch des Parallelogramms der Kräfte für genügend befunden hatten, glaubte man nun nicht mehr auskommen zu können. Man bemühte sich, das letztere direct aus der herrschenden Vorstellung von unvermittelt in die Ferne wirkenden elementaren Anziehungs- oder Abstossungskräften abzuleiten, konnte dabei aber doch zu keiner rechten Einigkeit über die Sicherheit der gegebenen Beweise gelangen. Meist legte man diesen Beweisen als physikalisches Axiom den Satz zu Grunde, dass die Resultante zweier gleichen Kräfte in die Halbirungslinie des Winkels der Kräfte fällt. Man gab zur besseren Beglaubigung des Satzes an, dass kein Grund vorhanden sei, warum die Resultante sich mehr der einen oder der anderen Componente nähern sollte, fügte aber zur Vorsicht auch wohl noch bei [1]), dass das Axiom von der Erfahrung bestätigt werde. Die letzte Aeusserung zeugte davon, dass man das Axiom doch keineswegs für unfehlbar sicher hielt und so haben sich denn auch eine grosse Anzahl von Mathematikern immer noch weiter um anschaulichere oder fundamental mehr gesicherte Beweise für das Parallelogramm der Kräfte bemüht.

G. W. Hearn [2]) ging, wie das Viele für richtiger hielten, von der

---

[1]) Vergl. „Lehrbuch der analytischen Mechanik" von Duhamel, übersetzt von Schlömilch, Leipzig 1858, I, S. 9 und 10. Um zu zeigen, dass bei ungleichen Kräften die Resultante ihrer Richtung nach mit der Diagonale des aus den Kräften construirten Parallelogramms zusammenfällt, theilt Duhamel die Strecken, welche die Kräfte darstellen, in eine bestimmte Anzahl gleicher Theile und zieht durch die Theilpunkte Parallelen zu den Seiten des Parallelogramms, theilt also das Kräfteparallelogramm in Rhomben. Indem er dann ausser der obigen Annahme noch die andere Annahme benutzt, dass die Kräfte sich in ihrer Richtung verschieben lassen und dass Kräfte, welche dieselbe Richtung haben, sich einfach addiren, vermag er zu zeigen, dass die zwei zu componirenden Kräfte sich parallel mit sich selbst in den anderen Endpunkt der Diagonale übertragen lassen, womit der Beweis im Grunde vollendet ist.

[2]) Phil. Mag. (3) XXIX, p. 258, 1846. Sind drei Kräfte, $P$, $Q$ und $R$, in einer Ebene, welche mit einer beliebigen Geraden der Ebene resp. die Winkel $\vartheta$, $\alpha + \vartheta$ und $\beta + \vartheta$ bilden, im Gleichgewicht, so muss $Pf(\vartheta) + Qf(\alpha + \vartheta) + Rf(\beta + \vartheta) = o$ oder, wenn wir $\vartheta$ selbst gleich Null setzen, $Pf(o) + Qf(\alpha) + Rf(\beta) = o$ sein. Durch zweimalige Differentiation folgt daraus

$$Pf'(o) + Qf'(\alpha) + Rf'(\beta) = o$$

und

$$Pf''(o) + Qf''(\alpha) + Rf''(\beta) = o.$$

Werden zwei von diesen Gleichungen mit passenden Coëfficienten $\lambda$ und $\mu$ multiplicirt und zur dritten Gleichung addirt, so erhält man $f''(\alpha) + \lambda f'(\alpha)$

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

Projection der Kraft auf eine bestimmte Richtung als dem fundamentaleren Problem aus und bemühte sich mit der Annahme auszukommen, dass die Componente einer Kraft $P$ für eine bestimmte Richtung, die mit der Kraftrichtung den Winkel $\vartheta$ bildet, gleich $P f(\vartheta)$ sei, wobei dann am Schlusse des Beweises natürlich die Gleichung $f(\vartheta) = cs\,\vartheta$ resultirte. In ähnlicher, nur umgekehrter Weise setzte A. von Ettingshausen[1]) bei rechtwinkeligen Componenten den Winkel $\alpha$ zwischen der einen Componente und der Resultante gleich einer Function des Verhältnisses der Componenten, also $\alpha = f\left(\frac{Q}{P}\right)$, und bewies dann mit Hülfe von Differentiationen und Integrationen, dass diese Function eine cyklometrische, nämlich $\alpha = arctg\left(\frac{Q}{P}\right)$, oder $tg\,\alpha = \frac{Q}{P}$ sei. A. F. Möbius[2]) wollte für einen Beweis des Parallelogramms der Kräfte nur die beiden an sich klaren Sätze gebrauchen: „1) Die Resultante von Kräften, welche in einer und derselben Geraden liegen, ist gleich der algebraischen Summe der Kräfte. 2) Wenn man von zwei oder mehreren auf einen Punkt wirkenden Kräften eine jede mit Beibehaltung ihrer Richtung ihre Grösse in gleichem Verhältniss ändert, so wird auch die Grösse der Resultante nach demselben Verhältniss sich ändern, während ihre Richtung unverändert bleibt.“ Doch setzt er auch ohne Weiteres die Projectionen dreier im Gleichgewichte befindlichen Kräfte auf eine beliebige Gerade selbst wieder ins Gleichgewicht. Nach Möbius gab Crelle[3]) in seinem Journal gleich mehrere Beweise auf einmal für das Parallelogramm der Kräfte, von denen einer auch vom Hebelgesetze als seinem Fundamentalsatz ausging.

Wieder zwei neue Beweise gaben W. Matzka[4]) und Raabe[5]) im Jahre 1856, und endlich versuchte auch Schlömilch[6]) im Jahre 1857 den analytischen Beweis nach der Art von Ettingshausen noch zu verbessern und unangreifbarer zu machen.

Alle diese Beweise aber, und die Zahl derselben ist mit den erwähnten

---

$+ \mu f(\alpha) = o$ oder auch $f''(\beta) + \lambda f'(\beta) + \mu f(\beta) = o$, woraus man allgemein schliesst $f''(\vartheta) + \lambda f'(\vartheta) + \mu f(\vartheta) = o$. Durch Integration dieser Differentialgleichung erhält man $f(\vartheta) = A e^{a\vartheta} + B e^{b\vartheta}$ oder, weil die Function $f(\vartheta)$ periodisch sein muss, $f(\vartheta) = A\, cs\, n\vartheta + B\, sn\, n\vartheta$. Mit Hülfe der Annahmen, dass für $\vartheta = o$ der Werth $f(o)$ gleich 1 und für $\vartheta = \frac{\pi}{2}$ der Werth $f\left(\frac{\pi}{2}\right)$ gleich Null sein soll, folgt dann leicht das Endresultat $f(\vartheta) = cs\,\vartheta$.

[1]) Wiener Sitzungsber. II, S. 155, 1849.

[2]) Ber. d. Ges. d. Wissensch. zu Leipzig 1850, S. 10. A. F. Möbius, 1790—1868, Professor d. Astr. in Leipzig.

[3]) Journ. für reine und angew. Mathematik XLIV, S. 220, 1852.

[4]) Abh. d. böhmischen Ges. d. Wissenschaften (5) IX, S. 1.

[5]) Vierteljahrsschrift d. naturf. Ges. in Zürich 1856, S. 223.

[6]) Zeitschr. f. Math. und Physik 1857. S. 84. O. Schlömilch, geb. 1823 in Weimar, Herausgeber der vorstehenden Zeitschrift.

noch lange nicht abgeschlossen, mussten, sowie sie, über die Bewegungserscheinungen hinausgehend, vom Begriffe der Kraft aus zum Ziele kommen wollten, an Dunkelheiten und Unsicherheiten leiden. Wir haben schon früher darauf aufmerksam gemacht, dass selbst die Summation von Kräften, die in eine gerade Linie fallen, nicht unzweifelhaft klar und sogar recht schwer begreiflich ist; es ist nicht zu verwundern, wenn bei der Addition von Kräften verschiedener Richtung die Schwierigkeiten in erhöhtem Maasse auftreten. Das Gesetz vom Parallelogramm der Kräfte gehört zu den Problemen der Kräfteübertragung. Alle Kräfteübertragungen sind aber nur an der Materie möglich und nehmen dadurch an allen Dunkelheiten Theil, die in dem Begriffe der letzteren liegen; ja sie bilden schliesslich, wie wir später noch mehr sehen werden, den innersten Kern des Begriffs der Materie. Weder in dem Begriffe der Kraft noch in dem der Bewegung liegt die Vorstellung von einer Wechselwirkung mehrerer Kräfte oder Bewegungen, nicht die Möglichkeit und noch weniger die Art einer solchen. Kein Mathematiker wird darum aus den Begriffen von Kraft und Bewegung allein eine Ableitung des Parallelogramms der Kräfte herausklauben, und ein Beweis, der das verspricht, wird immer ein erschlichener sein. Gerade die Beweise für das Parallelogramm der Kräfte zeigen, dass lange mathematische Schlussketten, in denen allgemeine Hypothesen nachträglich specialisirt werden, gegen solche unbewusste Erschleichungsversuche durchaus nicht gesichert sind. Jedem Beweise für das Parallelogramm der Kräfte müssen bestimmte Annahmen über einfachste Fälle des Problems zu Grunde gelegt werden, die als rein anschaulich klar oder erfahrungsmässig sicher erscheinen und aus denen dann das allgemeine Gesetz abgeleitet wird. Diese Annahmen können sich auf die Zusammensetzung zweier Kräfte oder auch auf die Projection einer Kraft auf eine bestimmte Richtung beziehen, aber sie müssen bestimmte Maassverhältnisse enthalten; auch die Beweise z. B., welche für die Projection der Kraft nur eine unbestimmte Abhängigkeit der Kraftgrösse vom Projectionswinkel hypothesiren wollen, sind in ihrem Verlaufe doch gezwungen, für einzelne Projectionswinkel wie $0^0$ oder $90^0$ die Kraft noch als bestimmt anzunehmen. Damit fällt aber der Zweck der meisten so künstlich aufgebauten Beweise, die eben nicht das allgemeine Gesetz aus einfachen, in sich klaren Specialfällen begreiflich machen, sondern dasselbe ohne jedes materielle Räthsel, aus dem Begriffe der Kraft, als einer Ursache von Bewegung, allein ableiten wollten. Wirklich haben sich auch in der neueren Zeit die Beweise für das Parallelogramm der Kräfte mehr und mehr verloren, und man hat danach in die Lehrbücher der theoretischen Mechanik dasselbe als ein empirisch oder erkenntnisstheoretisch zu begründendes Fundament jeder Kräfteanschauung einfach aufgenommen.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

Hatte man es hier mit Schwierigkeiten mehr metaphysischer Natur zu thun, die ausserhalb des Gebietes der Mathematik lagen, so trafen die Mechaniker in dieser Periode doch auch auf andere, die recht eigentlich mathematische waren. Seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts, wo man die Mechanik der Punkte zu einer Mechanik der physischen Körper zu erweitern begann, hatte man sich viel und intensiv mit den Rotationsbewegungen beschäftigt und war auch gerade in letzter Zeit, hauptsächlich durch Poinsot, zu ziemlich abschliessenden Resultaten gekommen. Jetzt richtete man die Aufmerksamkeit von den einfacheren Problemen weiter auf die daraus hervorgehenden zusammengesetzteren. Vor Allem tauchten die allerdings schon früher behandelten Fragen nach den Bewegungen rotirender Körper unter dem Einflusse äusserer störender Kräfte, wie nach den Eigenbewegungen einzelner Körper auf rotirenden Systemen wieder auf; und obgleich die Mittel der Mathematik zur vollen Lösung dieser Probleme noch nicht recht ausreichen wollten, so drängte sich doch die Thatsache, dass wir selbst auf einem solchen rotirenden Systeme, der Erde, uns befinden, immer wieder zu neuen, nun nicht bloss mathematischen, sondern auch experimentellen Untersuchungen dieser Fragen.

Dreissig Jahre nach Benzenberg's Messungen griff F. Reich die Fallversuche wieder auf[1]), um abermals die durch die Umdrehung

---

[1]) Ferdinand Reich (19. Februar 1799 Bernburg — 27. April 1882 Freiberg, Professor der Physik): Fallversuche über die Umdrehung der Erde, Freiberg 1832. Einige Jahre nach diesen Versuchen bestimmte Reich wie Cavendish mit Hülfe der Drehwage die mittlere Dichte der Erde (Versuche über die mittlere Dichte der Erde etc., Freiberg 1838) und fand dafür den Werth 5,44. Auf demselben Wege aber erhielt Francis Baily etwas später (Experiments with the Torsion Rod etc., London 1843, Phil. Mag. (3) XXI, p. 111; Pogg. Ann. LVII, S. 453) das Resultat 5,67. Bei wiederholten Messungen kam dann Reich zu der etwas besser stimmenden Zahl 5,5832, mit einem wahrscheinlichen Fehler von 0,0149 (Pogg. Ann. LXXXV, S. 189.) J. Plana (Astr. Nachrichten XXXV, S. 177, 1852) berechnete, wie Laplace, die mittlere Dichte der Erde aus der durch die Rotationsbewegung bedingten Zunahme der Dichte nach dem Erdinnern zu, fand aber unwahrscheinliche Resultate. Airy nahm den mathematisch abgeleiteten Satz zu Hülfe, dass ein Punkt im Innern einer Kugel von dieser eine Anziehung erleidet, welche der Anziehung der Kugel gleich ist, die die Entfernung des angezogenen Punktes vom Mittelpunkte zum Radius hat. Er beobachtete vermittelst der Schwingungen eines Pendels die Intensität der Schwere an der Erdoberfläche und an dem unteren Ende eines Bergwerksschachtes, zuerst in den Jahren 1826—1828 wenig erfolgreich in einem Kupferbergwerke in Cornwallis und dann 1854 sehr sorgfältig mit sieben Gehülfen in einem Kohlenschachte in Northumberland. Aus der geschätzten Dichte der Erdschale zwischen beiden Beobachtungspunkten folgte aber für die mittlere Dichte der Erde die unwahrscheinlich grosse Zahl 6,566 $\pm$ 0,0182 (Phil. Trans. 1856, p. 297; Pogg. Ann. XCIII, S. 599). Haughton glaubte, dass Airy die Dichte der Erdschale mit 2,5 zu hoch angenommen, weil er die Meere nicht berücksichtigt und erhielt aus Airy's Messungen, indem er die Dichte der Erdschale zu 2,059 annahm, für die

der Erde verursachten Abweichungen der fallenden Körper von der Lothlinie genau zu studiren. Er fand im Jahre 1831 durch sehr zahlreiche Versuche im Dreibrüderschacht zu Freiberg, dass bei einer Fallhöhe von 158,5407 m die östliche Abweichung 28,396 mm betrug. Ausserdem aber zeigte sich auch hier wieder, wie bei Guglielmini in Bologna und wie bei Benzenberg in Hamburg, die unerklärte südliche Abweichung und zwar in der Grösse von 4,374 mm. Reich sagt über dieselbe: „Was die letztere betrifft, so übersteigt ihre Grösse den wahrscheinlichen Fehler nicht genug, um sie ausser allen Zweifel zu setzen, man sieht sich aber genöthigt, Benzenberg's Worte zu wiederholen: „„Sonderbar bleibt doch diese Tendenz der Fehler nach Süden““ [1]). Trotzdem blieb man um diese Zeit allgemein bei dem negativen Resultate, welches Laplace [2]), Gauss [3]) und Olbers [4]) im Anfange dieses Jahrhunderts für die südliche Abweichung abgeleitet hatten. Gauss hatte gefunden, dass die östliche Abweichung der Winkelgeschwindigkeit der rotirenden Erde einfach, die südliche Abweichung aber dem Quadrate derselben proportional, dass die letztere danach ganz unmerklich werde und dass auch die Berücksichtigung des Luftwiderstandes an diesem Verhältniss nichts ändere [5]). Olbers war anfangs zu

---

Dichte der Erde 5,489 (Phil. Mag. (4) XII, p. 50, 1856; Pogg. Ann. XCIX, S. 332). Andere aber machten darauf aufmerksam, dass wegen der Unsicherheit dieser Schätzungen Airy's Methode keine grössere Genauigkeit geben könne als die von Maskelyne und Hutton. Jolly nahm darum in den siebziger Jahren die Messungen nach einer ganz neuen Methode wieder auf. (Wiedem. Ann. XIV, S. 331, 1881.) Er hängte in einem Thurme eine sehr feine Wage auf, an deren Wagschalen mittelst 21,005 m langer Drähte zwei weitere Schalen angehängt waren. Ein Versuchskörper wog dann in den unteren Schalen wegen der Annäherung an den Erdmittelpunkt mehr als in den oberen. Die Differenz dieser Gewichte wurde noch dadurch vergrössert, dass bei beiden Wägungen in der oberen und der unteren Schale unter die betreffende Schale immer ein und derselbe Bleiblock gebracht wurde. Aus der Differenz dieser Gewichtsdifferenzen ergab sich die Wirkung des Bleiblocks und mit Hülfe des bekannten specifischen Gewichtes des Blockes bestimmte dann Jolly die mittlere Dichte der Erde auf 5,692. Die Hauptnachtheile bei diesen Wägungen sind wohl die Kleinheit der beobachteten Gewichtsdifferenzen und vielleicht auch die weite Entfernung der Wagschalen. Mit neueren Versuchen, die diese Nachtheile vermeiden sollten, sind jetzt die Physiker A. Richarz und F. König unter Benutzung einer verbesserten Jolly'schen Wage beschäftigt. Wiedem. Ann. XXIV, S. 664, 1885.

[1]) Fallversuche über die Umdrehung der Erde, Freiberg 1832, S. 46.

[2]) Bull. d. sciences par la Soc. Philomath., Plairial an 11 (1803); abgedruckt in Benzenberg, Versuche über die Umdrehung der Erde, S. 388.

[3]) Abgedruckt Benzenberg, S. 363.

[4]) Benzenberg, S. 372. H. W. Olbers, 1758—1840, praktischer Arzt in Bremen, berühmter Astronom.

[5]) Ibid., S. 370. Gauss erhält (ohne Berücksichtigung des Luftwiderstandes): Fallraum $= \frac{1}{2}\, g t^2 + \frac{1}{6}\, \cos^2 \varphi\, g\, n^2 t^4 \ldots$; östliche Abweichung

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

einem Werthe für die südliche Abweichung gekommen, der genau mit den von Guglielmini und Benzenberg erhaltenen Resultaten stimmte, gab aber dann auf Erinnern von Gauss zu, dass auch nach seinen Ableitungen die gefundene südliche Abweichung durch ein anderes Moment compensirt werde und so gänzlich verschwinde. Unterscheiden wir nämlich zwischen der Richtung der Schwere und der Lothlinie, welche die Richtung der Componente aus der Schwere und der Centrifugalkraft angiebt, und bezeichnen mit $r$ den Radius der Erde, mit $t$ die Fallzeit, mit $a$ die Fallhöhe, mit $\tau$ die Rotationsdauer der Erde in Secunden, mit $\psi$ die Polhöhe und mit $g'$ die Beschleunigung des Falles unter Einfluss von Gravitation und Centrifugalkraft, so ist nach Olbers die (südliche) Abweichung der Lothlinie von der Gravitationsrichtung $\lambda = \frac{ar \sin 2\psi}{g'}\left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2$, die (südliche) Abweichung des gefallenen Körpers von der Gravitationslinie aber $\lambda' = t^2 r \sin 2\psi \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2$ und mithin die südliche Abweichung des gefallenen Körpers von der Lothlinie $\lambda' - \lambda = \left(t^2 - \frac{a}{g'}\right) r \sin 2\psi \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2$. Fiele der Körper im leeren Raume, so wäre $t^2 = \frac{a}{g'}$ und demgemäss $\lambda' - \lambda = o$; durch den Widerstand der Luft wird aber $t^2 > \frac{a}{g'}$ und $\lambda' - \lambda$ erhält einen gewissen Werth, der, wie bemerkt, mit Benzenberg's und Guglielmini's Versuchen stimmt. Indessen kann dies nach Gauss nicht richtig sein; da die Luft gegen die Lothlinie in relativer Ruhe ist, so wirkt ihr Widerstand dem Falle gerade entgegen und kann keine Abweichung hervorbringen. Die beiden Grössen $t^2$ und $\frac{a}{g'}$ müssen in gleicher Weise durch den Luftwiderstand beeinflusst werden und die Grösse $\lambda' - \lambda$ immer zu Null werden [1]). Die kleine Abweichung nach Süden endlich, die daraus resultirt, dass die Centrifugalkraft oben am Anfangspunkt der Fallbahn etwas grösser ist als am Fusspunkt derselben, hielt er für völlig unmerklich.

Zu einer lebhafteren Discussion über dieses Problem kam es aber in der Mitte der vierziger und Anfang der fünfziger Jahre, nachdem Oersted im Jahre 1846 auf einer Versammlung Britischer Naturforscher über die südliche Abweichung fallender Körper gesprochen [2]).

---

$= \frac{1}{3} \cos\varphi\, g\, n\, t^3 \ldots$; südliche Abweichung $= \frac{1}{6} \cos\varphi \sin\varphi\, g\, n^2 t^4 \ldots$; wo $n$ die Winkelgeschwindigkeit der Erde und $\varphi$ die Polhöhe des Beobachtungsortes.

[1]) So sagt Olbers; in der That aber handelt es sich doch noch immer darum, ob nicht der bewegte fallende Körper in anderer Weise von der Luft beeinflusst wird als das hängende Loth.

[2]) On the deviation of falling bodies, Report British Assoc. 1846;

Nach ihm erklärte J. Herschel diese Abweichung durch die elektrischen Erdströme, welche den Breitenkreisen parallel laufen. Diese Ströme erregen in dem fallenden Körper Inductionsströme und stossen danach denselben nach Süden mit einer Kraft ab, die der Fallhöhe proportional ist. Oersted war zuerst dieser Meinung günstig, schloss sich aber danach an Grove an, der betonte, dass Erdströme sowohl südlich als nördlich von dem fallenden Körper sich befänden und also sich in ihren Wirkungen aufheben müssten. Er schlug danach vor, eine hohe, luftdicht schliessende Röhre vielleicht in einem tiefen Bergwerksschacht zu construiren und darin die frei von jedem seitlichen Luftzuge sowohl im luftleeren Raume als auch in verschiedenen Gasen fallenden Körper abermals auf eine südliche Abweichung zu prüfen. W. W. Rundel [1]) hatte danach wieder in einem $1/4$ englische Meile tiefen Schachte Fallversuche angestellt, aber für die südliche Abweichung die merkwürdige Zahl von 10 bis 20 Zoll gefunden. William Redfield, jedenfalls unbekannt mit den Arbeiten von Gauss und Olbers, vermeinte die südliche Abweichung vollständig zu erklären, indem er darauf aufmerksam machte, dass die Centrifugalkraft nicht wie die Schwerkraft nach dem Centrum der Erde, sondern parallel der Aequatorebene gerichtet sei und mithin mit der Schwerkraft zusammen eine Componente ergäbe, welche auf der Nordhälfte der Erde von der Senkrechten nach Süden abweiche [2]). Bald darauf brachte Frédéric Petit [3]), Director der Sternwarte in Toulouse, dieselbe Erklärungsweise als neu, aber durchaus naheliegend und selbstverständlich vor.

Mechanik. c. 1840 bis c. 1860.

---

Bericht in Silliman's Journal (2) III, p. 138, 1847. Oersted wünschte, dass die Britische Naturforscherversammlung neue Messungen veranlassen und unterstützen möchte, weil die Methoden der Messung in neuerer Zeit sich beträchtlich vervollkommnet hätten, weil alle mechanischen Arbeiten in England mit grosser Vollendung ausgeführt würden, weil man dabei zugleich die Geschwindigkeit des Falles, wie den Widerstand der Luft und der Gase messen könne und weil endlich Wheatstone's Methode der Zeitmessung hier mit grossem Nutzen verwendet werden könnte.

[1]) The Mechanic's Magazine by Robertson, XLVIII, p. 485; Die Fortschr. der Physik im Jahre 1848, IV, S. 62.

[2]) Effects of the Earth's Rotation upon Falling Bodies and upon the Atmosphere, Silliman's American Journal of Science and Art (2) III, p. 283, 1847. Auf S. 451 desselben Bandes folgt eine Berichtigung (ohne Namen), in der darauf aufmerksam gemacht wird, dass Redfield nicht die sogenannte südliche Abweichung, sondern die Abweichung der Lothlinie von der Gravitationsrichtung erklärt. W. C. Redfield, 1789—1857, Mechaniker in New-York.

[3]) Compt. rend. XXXIII, p. 193, 1851. Petit's Worte klingen geradezu naiv: „M. d'Abbadie m'apprit qu'on venait tout récemment d'observer, en Allemagne, une déviation vers le sud, déviation regardée, ajoutait-il, par les divers physiciens qui s'en étaient occupés, comme une anomalie inexplicable et due tout simplement à des erreurs d'observation. Je fis remarquer, presque immédiatement, à M. d'Abbadie, que cette prétendue anomalie était, au contraire, une nouvelle confirmation du mouvement de rotation de la Terre, et qu'elle provenait de la séparation entre le parallèle et le vertical orienté de

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

Dupré[1]) verbesserte den Irrthum von Petit und berechnete dann selbst eine südliche Abweichung ganz in derselben Weise, wie Olbers dieselbe gefunden, aber nach der Arbeit von Gauss wieder aufgegeben hatte. Nach ihm ist die Abweichung der Lothlinie von der Gravitationsrichtung wie bei Olbers $d = \frac{\pi^2 R}{86\,164^2} \sin 2l t^2$ und die Abweichung des fallenden Körpers von der Gravitationslinie ohne Berücksichtigung des Luftwiderstandes ebenso gross. Denkt man aber daran, dass der fallende Körper des Luftwiderstandes wegen eine bestimmte Zeit $t'$ mehr zum Fallen gebraucht, als die Fallzeit $t$ im luftleeren Raume beträgt, so erhält man für die Abweichung des fallenden Körpers von der Gravitationsrichtung $d' = \frac{\pi^2 R}{86\,164^2} \sin 2l (t + t')^2$ und für die sogenannte südliche Abweichung, d. i. die Abweichung von der Lothlinie, $d' - d = \frac{\pi^2 R}{86\,164^2} \sin 2l\, [(t + t')^2 - t^2]$. „Für einen Fall von 100 m, sagt Dupré, hat man ungefähr $t = 4{,}5''$, $t'^2$ ist gegen $2tt'$ zu vernachlässigen, es kommt also für die Breite von $45^0$ $d_1 - d = t' \,.\, 75$ mm. Man sieht daraus, dass eine Verzögerung durch den Luftwiderstand von $^1/_{10}$ und selbst $^1/_{20}$ Secunde erlauben würde, diese Art der Abweichung durch Experimente festzustellen.“ Damit aber war man theoretisch erst da angekommen, wo Gauss und Olbers die Sache verlassen hatten. Die folgenden, nicht seltenen und theilweise auch bedeutenden Arbeiten[2]) haben dann auch das Problem meist in der Gauss'schen Art aufgefasst und die südliche Abweichung ohne Berücksichtigung des Luftwiderstandes nicht höher als 0,01 mm gefunden. Die Wirkung des Luftwiderstandes in einem etwa möglichen Einfluss auf die Abweichung fallender Körper

---

l'est à l'ouest, dans lequel se meuvent les corps qui tombent, en obéissant aux lois de Kepler, tandis que le pied de la verticale continue à se mouvoir le long du parallèle. Sur cette remarque, qui parut tout à fait concluante à M. d'Abbadie, ce dernier m'engagea à rechercher quelle serait la déviation éprouvée par un projectile lancé verticalement avec une vitesse initiale de 4 à 500 mètres. . . . Peu de jours après, j'annonçais à M. d'Abbadie que la déviation vers le sud serait, non plus seulement égale à quelques millimètres, mais bien à 50 ou 60 mètres.“ (p. 194.)

[1]) Compt. rend. XXXIV, p. 102, 1852. Dupré sagt über Petit's Bemerkungen mit vollem Rechte: „Il est aisé de montrer . . . que M. Petit à pris par inadvertance la verticale que donne le fil à plomb au lieu de la véritable direction de la pesanteur.“ (p. 103.) A. Dupré, 1808—1869, Prof. der Mathem. in Rennes.

[2]) Siehe: P. A. Hansen, Theorie der Pendelbewegung mit Rücksicht auf die Gestalt und Bewegung der Erde; Neue Schriften d. naturf. Gesellsch. zu Danzig V, 1856; im Auszuge Pogg. Ann. XCII, S. 21; C. E. Pagē, Nouv. Ann. de Mathem. (2) VI, p. 97, 1867; H. Resal, ibid. XI, p. 348, 1872; H. Bertram, Probleme der Mechanik mit Bezug auf die Variation der Schwere und der Rotation der Erde, Programm der höheren Bürgerschule in Berlin, 1869, S. 26.

ist kaum wieder ernstlich discutirt, und die von Reich gefundene südliche Abweichung von 4,374 mm ist weder aus der Sache selbst erklärt noch auf Beobachtungsfehler zurückgeführt worden.

Aehnliche Schwierigkeiten wie die Fallbewegung bot die Behandlung der Wurfbewegung und der Bewegung der Geschosse, nur dass man vor Allem bei der letzteren ausser der Rotationsbewegung der Erde auch noch die der bewegten Körper zu berücksichtigen hatte. Seit Poisson 1838 und 1839 das Problem der Abweichung der Geschosse aus der senkrechten Ebene, die durch die Geschützrichtung gelegt ist, in zwei Abhandlungen [1]) untersucht hatte, sind bis in die neueste Zeit zahlreiche Arbeiten über dieses Thema erschienen und vielfache Streitigkeiten auf diesem Gebiete ausgefochten worden, ohne dass eine Theorie zu allgemeiner Anerkennung hätte gelangen können. Am meisten Anhänger fand wohl, wenigstens unter den Physikern, die Theorie von Magnus, der im Jahre 1853 [2]) die Abweichung der Geschosse ganz aus der Rotation derselben und dem Widerstande der Luft ableitete. Magnus setzt voraus, dass der Einfluss der Luft derselbe bleibt, ob der betreffende Körper in der Luft, oder die Luft gegen den ruhenden Körper sich bewegt, und sucht dann experimentell diesen Einfluss festzustellen. Er beruft sich dabei auf seine Untersuchungen „über die Bewegung der Flüssigkeiten“ vom Jahre 1850 [3]), wo er festgestellt, dass, wenn eine Flüssigkeit mit einer gewissen Geschwindigkeit in eine gleichartige Masse einströmt, der Druck, welcher senkrecht gegen die Richtung der Bewegung stattfindet, geringer ist als der, welcher im Zustande der Ruhe vorhanden sein würde. Dem entsprechend konnte er nun (durch Flämmchen etc.) constatiren, dass die Strömung der Luft gegen einen Cylinder (oder eine Kugel) nicht eine Druckvermehrung an demselben, sondern eine Druckverminderung hervorbringt. Ruht der Cylinder vollständig, so ist die Druckverminderung auf beiden Seiten gleich; dreht sich derselbe aber um seine Achse, so ist der Druck auf der Seite, die sich der Luft entgegenbewegt, grösser als an der anderen, ja sogar grösser als im ruhenden Zustande. Die Ursache davon ist die seitliche Ausbiegung des Luftstromes an dem Körper. Auch bei runden Geschossen, die aus glatten Geschützrohren geworfen werden, entsteht wegen der excentrischen Lage des Schwerpunktes immer eine Rotation und damit eine Abweichung aus der Ebene der Flugbahn, die nur, weil die Rotation in verschiedenem Sinne erfolgt, auch nach verschiedenen Seiten liegt. Bei cylindrischen Geschossen aus gezogenen Geschützen, die rechts gebohrt sind, erfolgt auch die Abweichung immer nach rechts.

1) Sur le mouvement des projectiles dans l'air, en ayant égard à la rotation de la terre, Journ. École polytechnique XXVI, 1838. S. le mouv. d. proj. dans l'air, en ayant égard à leur propre rotation, ibid. XXVII, 1839.

2) Pogg. Ann. LXXXVIII, S. 1, 1853.

3) Ibid. LXXX, S. 1, 1850.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

Die Abweichung entsteht dadurch, dass durch den Luftwiderstand die Spitze des Geschosses etwas nach rechts abgelenkt wird. Die Resultirende des Widerstandes geht nämlich zwar durch die Achse des Geschosses, aber im Allgemeinen nicht durch den Schwerpunkt desselben; ob die Abweichung dann nach rechts oder links erfolgt, hängt zwar noch davon ab, ob die Resultirende des Widerstandes die Achse oberhalb oder unterhalb des Schwerpunktes trifft, bei den gebräuchlichen Geschossen scheint aber immer das Erstere der Fall zu sein. Die hierdurch erfolgende Hebung der Spitze bleibt indess fast unbemerkbar, da durch die Rotation des Geschosses die auf die Masse desselben einwirkenden Kräfte sich so zusammensetzen, dass die Spitze, statt sich zu heben, sich zur Seite bewegt, und zwar bei den rechts rotirenden Geschossen nach der rechten Seite. In Folge davon drückt dann die Luft auch den Schwerpunkt des Geschosses nach dieser Seite und bringt so die bekannte Abweichung hervor. „Zu gleicher Zeit senkt sich die Spitze, und dadurch hat es den Anschein, als ob der Druck der Luft gegen den hinteren Theil des Geschosses grösser als gegen den vorderen wäre, während er in der That gegen den vorderen Theil grösser als gegen den hinter dem Schwerpunkt liegenden ist" [1]).

Im engsten Zusammenhange mit den Untersuchungen über den Einfluss der Rotation der Erde auf die Bewegung der Körper auf ihrer Oberfläche steht Foucault's berühmter Pendelversuch, der wohl ebenso sehr durch diese Untersuchungen mit veranlasst worden ist, als er dann seinerseits dieselben wieder in grösserer Menge hervorgerufen und ihnen dann erhöhte Beachtung verschafft hat. Seine ersten Experimente stellte Foucault in einem Kellergewölbe an. Das Pendel bestand aus einem Stahldraht von 0,6 bis 1,1 mm Durchmesser und 2 m Länge und einer polirten Messingkugel von 5 kg Gewicht. Die Kugel war nach unten mit einer Spitze zur Markirung der Schwingungsbahn versehen, zugleich diente dieselbe dazu, das Pendel mit Hülfe einer Schleife an der Wand zu befestigen. Wurden die Schwingungen des Pendels durch Abbrennen des Fadens, der die Schleife bildete, ausgelöst, so zeigte das Pendel schon nach einer halben Stunde eine merkliche Abweichung von seiner ursprünglichen Schwingungsrichtung. Dasselbe Ergebniss, nur merklicher, gab eine Wiederholung der Versuche in dem Meridiansaale der Sternwarte zu Paris mit einem 11 m langen Pendel. Foucault veröffentlichte die Resultate dieser Untersuchungen in einer Abhandlung: „Démonstration physique du mouvement de rotation de la terre au moyen du pendule" [2]) und sprach darin, allerdings ohne

---

[1]) Pogg. Ann. LXXXVIII, S. 25.

[2]) Compt. rend. XXXII, p. 135, 1850; Pogg. Ann. LXXXII, S. 458. Schon die Florentiner Akademiker hatten die Abweichung des Pendels beobachtet, aber nach ihrer Weise die Ursache derselben nicht weiter verfolgt. Sie empfahlen nämlich zur Zeitmessung die Pendelkugel statt an einem an zwei divergirenden Fäden aufzuhängen, „weil das gewöhnliche, an einem

Ableitung, auch das Gesetz aus: Die scheinbare Drehung der Schwingungsebene des Pendels ist gleich dem Producte aus der Winkelbewegung der Erde in den Sinus der geographischen Breite des Aufhängungsortes des Pendels[1]).

Dieser directe anschauliche Beweis für die Rotation der Erde erregte natürlich das grösste Interesse aller Gebildeten und rief sogleich zahlreiche Arbeiten der Gelehrten hervor. C. Marx, J. A. Coombe, C. Marignac, J. R. Young, Sylvester, A. Thacker, R. Anstice, Clausen, Schaar, J. A. Gabbraith und S. Haughton, G. B. Airy, Crahay, Bellavitis, Woodburg, Eschweiler u. A. m. gaben noch in den Jahren 1850 und 1851 vielfältige Beweise für das Foucault'sche

---

Faden aufgehängte Pendel bei freiem Gange (aus welcher Ursache wollen wir nicht untersuchen) unmerklich von seinem ersten Wege abweicht und am Ende, wenn es sich der Ruhe nähert, nicht mehr den verticalen Bogen durchläuft, sondern in einer ovalen Spirale hin und her zu gehen scheint, in welcher Schwingungen weder unterschieden noch gezählt werden können". (Tentamina exp. nat., p. 19.) Aehnliche, auf diese Beobachtung sich beziehende Aeusserungen finden sich auch in Viviani's ungedruckten Papieren, sowie in Targioni's Notizie degli aggrandimenti delle scienze fisiche, accaduti in Toscano. (Firenze 1780.) Antinori hat auf diese Stellen zuerst aufmerksam gemacht. (Pogg. Ann., Erg. III, S. 159, 1853.) Sicherer und jedenfalls viel klarer ist die Beharrung der Schwingungsebene von Poinsinet de Sivry in einer Anmerkung zu einer Uebersetzung der Historia naturalis des Plinius (Vol. XII, p. 486, Paris 1782) angegeben worden: „Il y a un moyen d'obtenir une boussole sans aimant; c'est par un pendule mis en vibration selon une direction connue et relative à deux des points cardinaux en opposition; car le vaisseau, en tournant sur lui même, ne dérangerait pas pour cela cette direction une fois donnée au pendule, qu'il ne s'agirait plus que d'entretenir en mouvement par une puissance uniforme, c'est-à-dire par une puissance au force motrice constamment dirigée de haut en bas." (Dehaut in Compt. rend. LI, p. 575, 1860.) Poggendorff schliesst mit Recht, dass diese Worte noch auf einen Vorgänger in dieser Sache hinweisen, da Poinsinet de Sivry weder Mathematiker noch Physiker, sondern Literat und dramatischer Dichter war. (Pogg. Ann. CXII, S. 495, 1861.) Foucault selbst sagt über die Entstehung seiner Entdeckung (Pogg. Ann. LXXXII, S. 459): „Die Unabhängigkeit der Schwingungsebene von dem Aufhängepunkte kann durch einen leicht zu wiederholenden Versuch sichtbar gemacht werden, der mich auf dem Wege geleitet hat. An der Achse einer Drehbank und in der Richtung derselben befestige man einen runden, biegsamen Stahlstab, versetze ihn dann durch eine Ablenkung aus seiner Gleichgewichtslage in Schwingung und überlasse ihn dann sich selbst. . . . Wenn man nun die Achse der Drehbank mit der Hand in Bewegung setzt, sieht man, dass die Schwingungsebene nicht mit fortgeführt wird."

[1]) Jean Bernard Léon Foucault (18. Sept. 1819 Paris — 11. Febr. 1868 Paris), 1845 Redacteur des wissenschaftlichen Theils des Journal des Débats, 1855 Physiker an der Pariser Sternwarte, 1862 Mitglied des Längenbüreau.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

Drehungsgesetz. T. G. Bunt[1]) fand durch genaue Messungen an einem 53 Fuss langen Pendel in der St. Nicolaskirche in Bristol die stündliche Abweichung gleich 11,677° bis 11,814°, während die theoretisch berechnete 11,763° betrug. Dufour, Wartmann und Marignac experimentirten mit dem Foucault'schen Pendel in Genf, ebenso J. Philipps in New-York, Baden-Powell in Oxford, Pater Secchi in der Kirche des heiligen Ignaz zu Rom[2]), Glaens in Groningen, von der Willigen in Deventer, A. Noble und Campbell in der Musikhalle von Quebeck; Foucault selbst führte seine Versuche 1855 nochmals in grösster Oeffentlichkeit im Ausstellungspalaste zu Paris vor, in Deutschland endlich wurden sehr exacte Versuche im Dome zu Köln, wie auch im Dome zu Speyer angestellt[3]).

Dabei zeigten sich auch mehrfach Abweichungen von dem Foucault'schen Drehungsgesetze. H. Cox liess zwei Pendel von derselben Verticalebene aus ihre Bewegung beginnen und bemerkte, dass die Schwingungsebenen der beiden keineswegs im weiteren Verlaufe immer parallel blieben. Dufour, Wartmann und Marignac fanden, dass das Pendel aus dem Meridian des Ortes als ursprüngliche Schwingungsebene in 2,376 Stunden um 25° abwich, während dieselbe Abweichung aus einer zum Meridian senkrechten Ebene schon in 2,110 Stunden erreicht wurde[4]). Dufour hielt dafür, dass dieser Zeitunterschied zu gross sei, als dass man ihn durch Beobachtungsfehler erklären könne. Es müsse vielmehr unabhängig von der allgemeinen Bewegung eine störende Ursache geben, welche das Pendel mehr aus der Senkrechten zum Meridian als aus diesem selbst ablenkt. Diese störende Ursache äussere sich auch auf die Weise, dass die Pendelschwingungen, wenn sie von der zum Meridian Senkrechten ausgingen, immer elliptisch würden, während sie sonst streng in einer Ebene blieben. Dufour glaubte, dass die störende Kraft die Centrifugalkraft der rotirenden Erde sein könnte[5]). Diese merkwürdigen Beobachtungen fanden vielfache Zustimmung, aber auch mannigfachen Wider-

---

[1]) Phil. Mag. (4) I, S. 552; II, S. 37 u. s. f., 1851.

[2]) Diese Versuche sind in den Schriften der päpstlichen Akademie dei Lincei (Atti Accad. Nuov. Linc. IV, 1850—1851) veröffentlicht, die katholische Kirche erkannte danach die Lehre von der Bewegung der Erde als berechtigt an.

[3]) Bravais leitete theoretisch ab, dass ein conisches Secundenpendel in Paris täglich um etwa drei Secunden schneller geht, wenn es sich von Osten nach Westen, als wenn es sich umgekehrt dreht (Compt. rend. XXXVII, p. 166; Pogg. Ann. LXXXVI, S. 315), und bestätigte diesen Satz durch Versuche in der Sternwarte zu Paris (Compt. rend. XXXVIII, p. 195; Pogg. Ann. LXXXVI, S. 318). Er knüpft daran folgende weitgehende Erwartung: „Nach obigen Bemerkungen steht zu hoffen, dass die Eigenschaft gewisser Substanzen, die Polarisationsebene des Lichtes zu drehen und die rechts und links kreisenden Aetherschwingungen mit ungleicher Geschwindigkeit fortzupflanzen, eine vollständigere Erklärung finden werde.“ (Pogg. Ann. LXXXVI, S. 317.)

[4]) Compt. rend. XXXIII, p. 13; Pogg. Ann. LXXXIV, S. 149.

[5]) Pogg. Ann. LXXXIV, S. 150.

spruch. Zantedeschi bestätigte dieselben ohne Weiteres, Walker aber kam zu gerade entgegengesetzten Resultaten und Mossotti fand den Einfluss des Azimuths auf die Geschwindigkeit der Drehung überhaupt unmerklich. Poncelet[1]) endlich zeigte 1860, dass selbst am Pole der Radiusvector, der aus der Ruhelage des Pendels nach seiner jeweiligen Horizontalprojection gezogen wird, nur unter ganz besonderen Umständen, die praktisch nicht erfüllbar sind, sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegen kann. Auch der schon von den Florentiner Akademikern beobachtete regelmässige Uebergang der ebenen Pendelschwingungen in elliptische erregte wieder die Verwunderung der Beobachter, ohne dass man doch die besondere Ursache dieses Vorganges entdecken konnte. Schliesslich hielt man es für das Sicherste, alle die Unregelmässigkeiten in dem Verlaufe der Pendelschwingungen und der Drehung der Schwingungsebene nicht in der Drehung der Erde, sondern in zufälligen, aber doch fast überall wirksamen Ursachen, wie dem Einflusse der Art der Aufhängung und der Auslösung des Pendels, dem Luftwiderstande, Luftströmungen u. a. zu suchen. P. A. Hansen[2]) zeigte speciell im Jahre 1856, dass neben der Drehung der Erde auch eine meist eintretende Rotation der Pendelkugel Einfluss auf die Bewegung der Schwingungsebene habe (ein Einfluss, der je nach der Richtung der Rotationen die Geschwindigkeit der Drehung der Schwingungsebene bald beschleunigt und bald verzögert), und dass der Luftwiderstand alle störenden Wirkungen beträchtlich vergrössert. Damit schien dann die Untersuchung des Problems bis zu einem gewissen, vorläufigen Abschluss gelangt. Das actuell wissenschaftliche Interesse an demselben schwand mehr und mehr; der Foucault'sche Pendelversuch wurde aus einer allgemein angestaunten und bewunderten Neuheit ersten Ranges zu einem gewohnten und wohl auch vernachlässigten Vorlesungsexperiment. Noch im Jahre 1858 verzeichnen die Berliner Berichte über die Fortschritte der Physik mehr als 20 mehr oder weniger bedeutende wissenschaftliche Abhandlungen über den Foucault'schen Versuch, schon im nächsten Jahre aber war die Zahl derselben auf drei und bald darauf auf Null herabgesunken.

Die Schwierigkeiten, welche der mathematischen Behandlung der Rotationserscheinungen entgegenstanden, führten die Physiker und speciell Foucault dazu, Rotationsapparate zu erfinden, welche die Gesetze rotirender Körper anschaulich abzuleiten erlaubten. Bohnenberger[3]) hatte schon 1817 zur Demonstration der Rotationserscheinungen der Himmelskörper sein Maschinchen, eine in zwei beweglichen Ringen cardanisch aufgehängte Kugel, construirt. Foucault gab nun

---

[1]) Compt. rend. LI, p. 467 und 511.

[2]) Schriften d. naturforsch. Ges. in Danzig, Bd. V, Heft 1. Im Auszuge Pogg. Ann. XCII, S. 21. P. A. Hansen, 1795—1874, berühmter Astronom in Gotha.

[3]) Beschreibung einer Maschine zur Erläuterung des Gesetzes von der Umdrehung der Erde, Gilbert's Annalen LX, 1818.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

im Jahre 1852 unter dem Namen Gyroskop [1]) eine vereinfachte, aber verbesserte Form dieser Maschine. Das Gyroskop bestand nur aus einer, in einem Ringe um eine feste Achse drehbaren Scheibe. Wenn die Scheibe in schnelle Rotation versetzt wurde, konnte man den Ring auf die feste Spitze eines Stativs aufsetzen, auch so, dass der Apparat schief auf der Spitze stand, ohne dass die Scheibe von der Spitze herabfiel. Mit diesem Gyroskop bewies Foucault zunächst die speciellen Sätze [2]): Wenn man der Rotationsachse nur eine Bewegung in dem Horizonte erlaubt, so strebt die Achse, sich in den Meridian einzustellen, und zwar in der Weise, dass die Drehung der Maschine wie die Drehung der Erde vor sich geht; erlaubt man aber der Achse, sich im Meridiane zu bewegen, so stellt sie sich parallel zur Erdachse ein. Bald danach gab er dann das allgemeine Gesetz [3]): „Wenn ein Körper um eine seiner Hauptachsen rotirt, und eine Kraft oder ein System von Kräften eine andere, jener ersteren nicht parallele Drehung hervorzubringen strebt, so ist der Endeffect eine Bewegung der Drehungsachse in die Lage der Achse dieser zweiten Drehung, und zwar auf einem solchen Wege, dass die ursprüngliche Drehung der neuen parallel vor sich geht.“ Diese experimentelle Behandlung der Rotationsprobleme erregte ebenso wie der vorhergegangene Pendelversuch, das allgemeine Interesse der Physiker und rief ebenfalls viele Abhandlungen über dieses Thema und manche verbesserte Apparate hervor. Noch in demselben Bande der Comptes rendus, in welchem Foucault's Arbeiten erschienen waren, veröffentlichten Person, Quet u. A. weitere Abhandlungen über dasselbe Problem. Sire [4]) und Lamarle [5]) erklärten, dass sie noch vor Foucault im Jahre 1851 Rotationsapparate verfertigt oder beschrieben hätten, was aber bei dem Vorhandensein des viel älteren Bohnenberger'schen Apparates nicht viel Aufsehen erregen konnte. Der Mechanikus Fessel construirte 1853 seine verbesserte Foucault'sche Rotationsmaschine, die Plücker warm empfahl und zu weiteren Untersuchungen gebrauchte [6]). In demselben Jahre bestätigte Poggendorff das lobende Urtheil Plücker's über die Fessel'sche Maschine und gab die viel wieder-

---

[1]) Compt. rend. XXXV, p. 421, 1852.

[2]) Ibid., p. 424.

[3]) Ibid., p. 602.

[4]) Sire veröffentlichte im Cosmos (Bd. I, p. 603, 1852) den Brief eines Herrn Terrier, wonach dieser schon im December 1851 eine Rotationsmaschine bei ihm bestellt hat.

[5]) Lamarle machte in den Bull. de Brux. (Bd. XIX, p. 31, 1852) bekannt, dass er noch am 5. April 1851 der Brüsseler Akademie ein paquet cacheté übergeben habe, in welchem die Beschreibung einer Rotationsmaschine enthalten war.

[6]) Pogg. Ann. XC, S. 174. Plücker's Worte sind charakteristisch für den damaligen Stand der Rotationstheorie: „Poisson hat bereits in einem besonderen Abschnitte seiner Mechanik die Bewegung be-

holten populären Beweise für die Gesetze derselben [1]). Auch G. Magnus, Wheatstone und Baden-Powell veröffentlichten noch 1854 wichtige Abhandlungen über dasselbe Thema.



Mit diesen Untersuchungen der Bewegungen rotirender Systeme standen, anfänglich wenigstens, auch Plateau's berühmte Versuche „über die Erscheinungen bei einer freien und der Einwirkung der Schwere entzogenen Masse" [2]) in Verbindung. Sein Apparat war ein aus ebenen, in eiserne Rahmen eingekitteten Glasplatten bestehendes, oben offenes Gefäss von 25 cm Breite und 20 cm Höhe. Derselbe war mit einer Mischung von Wasser und Alkohol gefüllt, in der eine specifisch gleich schwere Masse aus Olivenöl schwamm, die sich unter der alleinigen Einwirkung ihrer Cohäsionskraft zur Kugel rundete [3]). Durch die Mitte des Gefässes ging eine feine eiserne Achse, welche in ihrer halben Höhe eine zu ihr senkrechte Scheibe von 35 mm Durchmesser trug, der von aussen her eine Rotation beigebracht werden konnte. Wurde die Oelkugel an die vorher mit Oel benetzte Scheibe gebracht, so vertheilte sie sich symmetrisch und rotirte mit derselben. Die 6 cm

stimmt, die ein der Kraft der Schwere unterworfener Rotationskörper, welcher um seine Achse rotirt, in dem Falle annimmt, dass diese Achse um einen ihrer Punkte frei beweglich ist. Auch die neueste Arbeit des Herrn Poinsot, der das grosse Verdienst hat, dass er die Erscheinungen der Rotationsbewegung so entwickelt, dass man die einzelnen Schritte der Entwickelung mit dem Auge verfolgen kann, enthält allgemeine Resultate, die sich leicht auf den eben bezeichneten Fall übertragen lassen. Nichts destoweniger liegen die fraglichen Erscheinungen bisher sehr wenig in unserer Anschauung, und darum erscheint es mir ein erwünschtes Zusammentreffen, dass Herr Fessel . . . seinerseits einen Apparat construirt hat, welcher, indem er diese Erscheinungen dem Auge vorführt, Jeden überrascht und geeignet ist, auch den Eingeweihten auf einen Augenblick stutzig zu machen." (S. 174.)

[1]) Pogg. Ann. XC, S. 548.

[2]) Mém. de l'Acad. Brux. XVI, 1843. Pogg. Ann., Ergänzungsbd. II, S. 249. Joseph Antoine Ferdinand Plateau (10. October 1801 Brüssel — 15. September 1883 Gent) studirte auf Wunsch seines Vormundes zuerst Jura, dann aber Mathematik, Physik und Chemie in Lüttich. 1827 wurde er Lehrer der Mechanik in Lüttich, 1830 in Brüssel, 1835 Professor der Experimentalphysik an der Universität Gent. Im Jahre 1843 erblindete er vollständig, setzte aber trotzdem mit Hülfe ergebener Schüler und Freunde seine experimentellen Entdeckungen mit fast unvermindertem Erfolge fort. (Annuaire de l'Acad. Royale de Belgique, 1885, p. 389.)

[3]) Ueber die Veranlassung zu diesen Untersuchungen sagt der Biograph Plateau's im Annuaire de l'Acad. Roy. de Belgique 1885, p. 422: „Son préparateur avait versé un peu d'huile grasse dans un vase contenant un mélange d'eau et d'alcool; le professeur vit avec surprise les petites masses d'huile affecter la forme sphérique; aussitôt il appliqua sa maxime consistant à s'étonner à propos; il fit du fait observé le sujet de longues réflexions et conçut un système d'expériences qui devait être appelé au plus brillant avenir."

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

im Durchmesser haltende Oelkugel, die ruhend in der Richtung der Achse etwas verlängert erschien, nahm bei der Drehung sofort eine Abplattung an den Polen an. Bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von zwei bis drei Umdrehungen in einer Secunde wurde die Kugel um die Achse hohl und verwandelte sich endlich in einen vollkommenen Ring, der aber mit der Scheibe noch durch ein dünnes Häutchen verbunden blieb und sich nur von derselben trennte, wenn man die Drehung plötzlich anhielt. Die erzeugende Fläche des Ringes schien dann ein Kreis zu sein; bei den Himmelskörpern, wie bei dem Saturn, mag der Planet selbst die Abplattung des Ringes bewirken; auch hier zeigte derselbe sich abgeplattet, so lange das Häutchen noch nicht gerissen war. Plateau wirft die Frage an die Mathematiker auf, ob ausser dem Ellipsoid noch andere Figuren rotirender Flüssigkeiten im Gleichgewicht sein könnten; für den Ring möchte er die Frage bejahen. Benutzte Plateau zur Bildung des Ringes eine grössere Scheibe von 5 cm Durchmesser und setzte im Moment der grössten Ausbildung des Ringes die Bewegung fort, so riss das Häutchen wie vorher beim Anhalten der Drehung, aber der Ring floss dann nicht zu einem Rotationssphäroid zusammen, sondern er theilte sich in einzelne Massen, die Kugelgestalt annahmen und die Rotation fortsetzten, zugleich aber auch eine eigene Rotation in der Richtung der Bewegung und öfters noch kleine Oelkugeln als Monde erhielten. Auch planetenähnliche Gestalten mit einem Ringe gelang es dadurch herzustellen, dass man eine Scheibe von 2 cm Durchmesser 15 Umdrehungen in der Secunde machen liess.

Die hier hervorgehobenen Beziehungen seiner Versuche zur Theorie der Bildung der Weltsysteme bezeichnete Plateau in seinen späteren Arbeiten indess selbst als zufällige[1]) und benutzte danach die von ihm entdeckte Methode, die Stoffe der Einwirkung der Schwere zu entziehen, allein zum Studium der Molecularkräfte und der Capillaritätserscheinungen. Er modificirte deshalb auch den Titel seiner Abhandlungen und gab den folgenden Serien seiner Arbeiten über dieses Thema die Ueberschrift „Experimentelle und theoretische Untersuchungen über die Gleichgewichtsfiguren einer flüssigen Masse ohne Schwere". In der ersten dieser Abhandlungen[2]), also der zweiten Serie der ganzen Folge, giebt er als allgemeine

---

[1]) In der folgenden Abhandlung sagt Plateau von jener ersten: „Il est presque purement expérimental, et l'on ne doit l'envisager que sous ce point de vue, à l'époque où je l'ai écrit, je n'avais pas encore étudié suffisamment la théorie de l'action capillaire, et il renferme à cet égard quelques petites erreurs; en autre, je m'y suis laissé entrainer à des comparaisons avec les faits astronomiques, faits qui ne peuvent avoir que des rapports fortuits avec les résultats de mes expériences." (Ann. de chim. et de phys. (3) XXX, p. 204.)

[2]) Mém. de l'Acad. Brux. XXIII, 1849; Auszug in Ann. de chim. et de phys. (3) XXX, p. 203. Arago führt in den Compt. rend. XXIX, p. 802, diese Abhandlungen mit den Worten ein: „Die belgische Regierung hat den Wissenschaften einen wesentlichen Dienst geleistet und hat sich selbst geehrt,

Formel für die Oberflächen der flüssigen Massen ohne Schwere $1/R + 1/R_1 = C$, wo $R$ und $R_1$ die kleinsten und grössten Radien in einem und demselben Punkte der Oberflächen und $C$ eine Constante bedeuten, die positiv oder negativ oder auch Null sein kann. Nach der ihm eigenen Methode gelang es ihm auch, aus der Oelmasse ohne Schwere im Alkohol verschiedene Gestalten, z. B. Cylinder, zu bilden, indem er zwei Scheiben aus Metall von gleichem Durchmesser mit dem Oel in Berührung brachte und dann die Scheiben von einander entfernte. Das Gleichgewicht dieser Cylinder war stabil, bis die Höhe das Dreifache des Durchmessers erreichte, bei stärkerer Verlängerung der Cylinder aber erlitten dieselben, meist an zwei Stellen, eine Einschnürung, und dazwischen bildete sich eine Ausbuchtung; zuletzt zertheilten sich die Cylinder in einzelne Massen, die Kugelgestalt annahmen.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

Noch in dieser Abhandlung führte Plateau auch die Savart'schen Beobachtungen über die merkwürdigen Gestalten der aus einer kreisförmigen Oeffnung ausfliessenden Wasserstrahlen auf die Cohäsion, der nicht die Schwere entgegen wirkt, zurück. Dieses Thema behandelte er in der nächsten Serie seiner Abhandlungen [1]) vom Jahre 1856 weiter und griff auch in der siebenten Serie [2]) von 1867 auf dasselbe zurück.

Neue Bahnen aber zur Untersuchung der Capillarkräfte, die von der Gegenwirkung der Schwere ganz oder theilweise befreit sind, schlug Plateau in der fünften Serie seiner Untersuchungen [3]) vom Jahre 1861 ein. Er hatte bemerkt, dass die Oelhäutchen im Alkohol an den bei den vorigen Experimenten benutzten Drahtgestellen ähnliche Formen wie Seifenhäutchen in der Luft annehmen; er überlegte, dass auch bei den letzteren ihrer Feinheit wegen die Schwere nur sehr wenigen Einfluss im Verhältniss zur Cohäsion haben könne, und studirte danach die Formen solcher Seifenhäutchen ganz speciell. 1 Gewichtstheil Marseiller Seife wurde in 40 Theilen destillirten Wassers gelöst, nach dem Erkalten filtrirt und $^2/_3$ des Volumens Glycerin zugesetzt. Nach einiger Zeit entsteht ein Niederschlag, der mit dem Heber abgenommen wird. Eine Hohlkugel aus dieser Flüssigkeit von 100 mm Durchmesser hielt sich drei volle Stunden lang, und die Flüssigkeit blieb ein Jahr brauchbar. Durch Eintauchen verschiedener Drahtgerippe in die Flüssigkeit und Beobachtung der entstehenden Flüssigkeitshäutchen fand Plateau

---

indem sie dem unglücklichen (seit mehreren Jahren erblindeten) Physiker das ganze Gehalt, welches er als Professor der Universität Gent bezog, belassen hat. Plateau selbst hat mit Hülfe von einigen ergebenen Freunden, welche ihm ihre Augen liehen und die Experimente unter seiner unmittelbaren Direction ausführten, seine interessanten Untersuchungen fortgesetzt. Das vorliegende Mémoire ist dafür der Beweis."

[1]) Mém. de l'Acad. Brux. XXX, 1856. Die vierte Serie (Mém. de l'Acad. Brux. XXXI; Pogg. Ann. CVII, S. 394, 1860) enthält Untersuchungen „über andere Umdrehungsgleichgewichtsfiguren als Kugel und Cylinder".

[2]) Mém. de l'Acad. Brux. XXXVI; Pogg. Ann. CXXX, S. 264, 1867.

[3]) Mém. de l'Acad. Brux. XXXIII; Pogg. Ann. CXIV, S. 597.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

folgende Gesetze: 1) In ein und derselben Flüssigkeitskante enden nie mehr als drei Häutchen, und diese bilden unter sich gleiche Winkel; 2) wenn im Innern eines Systems von Flüssigkeitshäutchen mehrere flüssige Kanten in ein und demselben Punkte endigen, so sind es immer vier, die unter sich gleiche Winkel bilden; 3) für jeden Punkt eines Flüssigkeitshäutchens, das nicht einer geschlossenen, an der Flüssigkeit gebildeten Oberfläche angehört, ist die Summe der reciproken Krümmungsradien Null; gehört der Punkt einer geschlossenen Oberfläche an, so ist diese Summe eine constante Grösse. Der Druck $p$, den eine kugelförmige Blase von dem Durchmesser $d$ auf die innerhalb befindliche Luftmasse ausübt, ergab sich durch theoretische Betrachtungen zu $p = \frac{2h\varrho}{d}$, wo $h$ die capillare Steighöhe der Flüssigkeit in einem Haarröhrchen von 1 mm Durchmesser und $\varrho$ die Dichte der Flüssigkeit bezeichnet. Plateau glaubte annehmen zu dürfen, dass die Dicke der die Blase bildenden Flüssigkeitshäutchen im Allgemeinen grösser als der doppelte Radius der Wirkungssphären der Molecularattraction, im Moment des Zerreissens der Blase aber diesem doppelten Radius nahezu gleich sein müsse. Aus den Farben der dünnen Häutchen ergab sich ihre Dicke zu $^1/_{8811}$ mm; der Radius der molecularen Wirkungssphäre würde also $^1/_{17\,622}$ mm oder in runder Zahl $^1/_{17\,000}$ mm betragen [1]).

In der sechsten [2]) und der achten [3]) Serie beschäftigte sich Plateau eingehend mit den Ursachen, welche bei der Entstehung, wie bei der Erhaltung der Flüssigkeitslamellen wirksam sein können. Er kommt dabei zu der Ueberzeugung, dass diese Ursachen nicht in der Zähigkeit der Flüssigkeiten allein, sondern mehr noch in der Oberflächenspannung derselben gesucht werden müssen, weil bei Flüssigkeiten von fast gleicher Zähigkeit doch die Fähigkeit, Lamellen zu bilden, eine ganz verschiedene sein kann. Diese Oberflächenspannung, welche der Zähigkeit entgegen wirkt und überall die Lamellen zu zerreissen strebt, ist abhängig von der Natur der Flüssigkeit und variirt im umgekehrten Sinne mit der Temperatur, ist dagegen unabhängig von der Krümmung der Oberfläche und von der Dicke der Lamelle, wenigstens so lange, als diese Dicke nicht kleiner wird als der doppelte Halbmesser der molecularen Attraction. Nach ihrer Fähigkeit, Lamellen zu bilden, sind dreierlei Arten von Flüssigkeiten zu unterscheiden. Die erste Art giebt beim Schütteln wenig Schaum, ihre Lamellen haben kurze Dauer und zeigen keine oder wenig Farben; ihnen muss eine grosse Oberflächenspannung und grössere äussere als innere Zähigkeit zugeschrieben werden. Zu dieser Classe gehören Wasser, Glycerin, con-

---

[1]) Pogg. Ann. CXIV, S. 608.

[2]) Mém. de l'Acad. Brux. XXXIII; Pogg. Ann. CXXX, S. 149, 1867.

[3]) Mém. de l'Acad. Brux. XXXVII; Pogg. Ann. CXLI, S. 44, 1870.

centrirte Schwefelsäure u. s. w. Die zweite Art bildet rasche, aber vergängliche Blasen von starker Färbung; sie unterscheidet sich von der ersten durch geringe capillare Oberflächenspannung und grössere innere als äussere Zähigkeit. Dazu gehören fette Oele, Alkohol, Benzin, Schwefelkohlenstoff u. s. w. Die dritte Art von Flüssigkeiten endlich bildet beim Schütteln einen lange verweilenden Schaum, lässt sich leicht zu Blasen auftreiben, und ihre Lamellen halten sich Stunden, ja Tage lang; sie haben kleine Oberflächenspannung und wieder grössere äussere als innere Zähigkeit. Beispiele hierfür sind Seifenlösungen, Eiweiss, geschmolzenes Glas u. s. w. Mit der verschiedenen Beständigkeit der Flüssigkeitslamellen beschäftigte sich Plateau auch noch weiter in den letzten Serien seiner Untersuchungen [1]), denen er schliesslich noch einen sehr reichen Literaturbericht über alle früheren Arbeiten, die dasselbe Thema behandeln, anfügte.

In der speciellen Theorie der Capillarität hatten übrigens die Experimentalphysiker schon länger Poisson's Ansicht von der Wirksamkeit der Oberflächenspannung sich ganz zu eigen gemacht. G. Hagen [2]) hatte in einer grösseren Arbeit vom Jahre 1845 Poisson's Ableitungen wieder experimentell so genau als nur zu erwarten bestätigt, und auch die mit Eifer unternommenen Messungen der Capillaritätsconstanten verschiedener Flüssigkeiten unter verschiedenen Verhältnissen fussten ganz auf Poisson's Theorie. Nur in einem Punkte fand man Gelegenheit, nicht nur über die älteren Theoretiker hinaus zu gehen, sondern auch dieselben zu berichtigen. Wenn die Capillaritätserscheinungen von den Molecularkräften, der Cohäsion, der Oberflächenspannung und der Adhäsion herrühren, so müssen sie auch durch alle physikalischen Kräfte verändert werden, welche die Molecularkräfte beeinflussen, und die Einwirkung dieser Kräfte, wie vor Allem der Wärme und wohl auch der Elektricität, muss sorgfältig studirt werden. Nach C. Wolf [3]) hat im Jahre 1768 Lalande zuerst darauf aufmerksam gemacht, dass die Capillarität von der Temperatur abhängig sei und dass warmes Wasser in Capillarröhren weniger hoch steige als kaltes. Laplace und Poisson haben dann beide übereinstimmend abgeleitet, dass bei benetzenden Flüssigkeiten für alle Temperaturen die freie Oberfläche immer dieselbe bleibt und dass danach die Steighöhen bei verschiedenen Temperaturen den Dichten der Flüssigkeit proportional sein müssen; für nicht benetzende Flüssigkeiten nur konnten sie kein Gesetz erlangen, weil bei diesen die Gestalt der Oberfläche mit der Temperatur sich ändert. Dagegen zeigte nun C. Brunner

---

[1]) 9., 10. und 11. Serie. Mém. de l'Acad. Brux. XXXVII, 1868.

[2]) Pogg. Ann. LXVII, S. 1 und 152. Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen (3. März 1797 Königsberg — 3. Februar 1884 Berlin), ursprünglich Wasserbaumeister, zuletzt Oberlandesbaudirector in Berlin.

[3]) Ann. de chim. et de phys. (3) XLIV, p. 230; Pogg. Ann. CI, S. 550, 1857.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

im Jahre 1847 [1]) durch sehr genaue und zahlreiche Versuche mit Wasser, wasserfreiem Aether und Olivenöl, dass diese theoretischen Resultate keineswegs richtig und dass vielmehr mit wachsender Temperatur die Steighöhen viel schneller als die Dichten der Flüssigkeiten abnehmen. Nach seinen Messungen werden die Steighöhen in Röhren von 1 mm für Wasser 15,33215 mm — 0,0286396 t, für Aether 5,3536 mm — 0,028012 t und für Olivenöl 7,4610 — 0,010486 t, welchen Formeln auch die Physiker im Allgemeinen zustimmten. Buys-Ballot [2]) betonte nur, dass er schon 1844 in seiner Inauguraldissertation die Laplace-Poisson'schen Ergebnisse zurückgewiesen und aus den Frankenheim'schen Versuchen für die der Steighöhe proportionale Grösse $a^2$ bei Wasser die Formel 15,3 mm — 0,028 t abgeleitet habe. Holtzmann [3]) machte darauf aufmerksam, dass seine Formel 607 — 1,1394 t, welche er 1845 für die Cohäsion des Wassers aufgestellt, durch Multiplication mit dem Factor $\frac{15,33215}{607}$ fast genau in die Brunner'sche Formel übergehe. Frankenheim [4]) aber nahm dann sogar die Steighöhen als von dem Quadrat der Temperatur abhängig an und berechnete dieselben nach einem Ausdrucke von der Form $a + bt + ct^2$. Er konnte auch nachweisen, dass die Depression des Quecksilbers, wie zu erwarten, mit der Temperatur stärker zunimmt als die Dichte abnimmt. C. Wolf [5]) endlich zeigte noch experimentell, was aus den empirischen Formeln als nothwendiges Ergebniss folgte, dass die Erhebung des Wassers in Capillarröhren bei genügend hohen Temperaturen wirklich in eine Depression übergehen könne.

Dagegen vermochte man eine Einwirkung der elektrischen Kräfte auf die Capillarerscheinungen nicht zu constatiren. J. W. Draper [6]) hatte im Jahre 1846 einen Zusammenhang zwischen diesen Erscheinungen behauptet. Brunner [7]) aber konnte weder beim Oeffnen noch beim Schliessen eines in einer Spirale um die Capillarröhre laufenden elektrischen Stromes eine messbare Veränderung der Steighöhe constatiren.

Viel untersucht und viel umstritten blieb auch die Art und die Ursache des Zusammenhanges zwischen den Capillar- und den diosmotischen Erscheinungen, um so mehr, als bei den letzteren noch schwerer zu sicheren Constanten als bei den ersteren zu gelangen war. Einen Fortschritt machte in dieser Beziehung Ph. G. Jolly

---

[1]) Pogg. Ann. LXX, S. 481. C. Brunner (von Wattenwyl), der Sohn von C. E. Brunner, geb. am 23. Juni 1823 in Bern, Prof. der Physik in Bern.

[2]) Pogg. Ann. LXXI, S. 177.

[3]) Ibid., S. 463.

[4]) Ibid. LXXII, S. 177 und LXXV, S. 229.

[5]) Compt. rend. XLII, p. 968, 1856.

[6]) Pogg. Ann. LXVII, S. 84.

[7]) Ibid. LXX, S. 481 und LXXIX, S. 173.

im Jahre 1849 [1]). Er brachte in eine Röhre, deren untere Oeffnung mit einer thierischen Blase überbunden war, eine abgewogene Menge der zu untersuchenden Flüssigkeit, hängte diese Röhre in ein grosses Gefäss mit Wasser, das von Zeit zu Zeit wieder gegen reines Wasser umgetauscht wurde, und wog die Flüssigkeit in der Röhre erst, wenn ihre Menge ganz constant geworden, wenn dieselbe also nur noch aus reinem Wasser bestand. Dadurch kam er zu dem Satze, dass für die Gewichtseinheit irgend eines gelösten Körpers unter sonst gleichen Umständen immer dasselbe Quantum Wasser eintritt; dieses Quantum nannte er das endosmotische Aequivalent des betreffenden Körpers. Als solche endosmotische Aequivalente fand Jolly bei Anwendung desselben Stückes Schweinsblase

Mechanik. c. 1840 bis c. 1860.

| | | |
|---|---|---|
| für schwefelsaures | Kali | 12,76 |
| „ „ | Magnesium | 11,80 |
| „ „ | Natrium | 11,03 |
| „ „ | Kupfer | 9,564 |
| „ Schwefelsäure | | 0,349 |
| „ Kalihydrat | | 231,40 |

Bei Anwendung verschiedener Blasen oder sogar verschiedener Stücke einer Blase ergaben sich allerdings Abweichungen, aber diese waren nicht so gross, dass man nicht doch von Mittelwerthen des Aequivalentes hätte reden können. Im Uebrigen bestätigte Jolly den Satz Dutrochet's, dass die Mengen der in bestimmten, gleichen Zeiten übergehenden Stoffe der Concentration der Salzlösungen proportional sind. Indessen erhoben sich sehr bald starke Zweifel gegen die Constanz des sogenannten endosmotischen Aequivalents. Karl Ludwig [2]) wandte fast direct gegen dasselbe ein, dass es schwankend und jedenfalls mit der Concentration der Lösungen veränderlich, ja dass selbst die Art der Abhängigkeit des Aequivalents von der Concentration nicht bei allen Flüssigkeiten dieselbe sei. A. Fick [3]) aber behauptete sogar, dass man verschiedene Werthe des endosmotischen Aequivalents schon dadurch erhalten könne, dass man den Wasserstrom einmal von oben nach unten und das andere Mal von unten nach oben gehen lasse. Nun konnte zwar Jolly mit ziemlicher Wahrscheinlichkeit gegen diese Angriffe anführen, dass die erhaltenen Schwankungen wohl am meisten auf eine Verschiedenheit der angewandten Membranen zurückzuführen seien; aber immerhin waren damit, wie auch noch durch manche andere Umstände, dem Jolly'schen Satze doch ziemlich enge Grenzen der An-

---

[1]) Pogg. Ann. LXXVIII, S. 261. Philipp Gustav v. Jolly (26. September 1809 Mannheim — 24. December 1884 München), Professor der Physik an der Universität München.

[2]) Ibid. LXXVIII, S. 307.

[3]) Ibid. XCII, S. 333.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

wendbarkeit gesetzt, da eben der Einfluss der Beschaffenheit der Membranen auf die Endosmose ein ganz unberechenbarer blieb.

Diese Unberechenbarkeit des Einflusses der Membranen zeigten auch die Versuche, welche nun Graham[1]) über die Diosmose der Flüssigkeiten anstellte. Er fand, dass Wasser mit einer Menge von Salzlösungen sehr lebendige diosmotische Ströme giebt, mit denen es fast gleiche capillare Kräfte hat[2]), und er schloss daraus, dass Poisson's Ansicht, nach welcher die Capillarität in der Diosmose die einzig treibende Kraft ist, nothwendig falsch sein müsse. Viel mehr als die Constanten der Capillarität sind nach ihm bei Untersuchung der endosmotischen Erscheinungen die chemischen Differenzen zwischen den osmirenden Flüssigkeiten unter einander, wie auch zwischen diesen und der Scheidewand und ebenso die elektrischen Gegensätze zwischen diesen Stoffen in Erwägung zu ziehen. Welcher Art dabei die Thätigkeit der Scheidewand sei und ob die Kraft mehr durch einen rein chemischen oder einen mehr elektrischen Gegensatz der Flüssigkeiten hervorgerufen werde, liess Graham unentschieden und gab deshalb der wirkenden Ursache den völlig nichtssagenden Namen der osmotischen Kraft. Nur so viel meinte er constatiren zu können, dass der Strom der Osmose (die Bewegung des Wassers) immer von der sauren Flüssigkeit zur basischen, oder von der positiven Seite der Membran zur negativen gehe[3]). Doch genügte ein einfacher chemischer Gegensatz zwischen den Flüssigkeiten selbst noch nicht, und wo nicht eine chemische Thätigkeit zwischen den Flüssigkeiten und der Membran noch hinzutrat, da verlor die Erscheinung ihren eigentlichen osmotischen Charakter und nahm mehr den der reinen Diffusion an. J. Liebig[4]) versuchte den Einfluss der Membran bei der Diosmose dadurch sicherer zu fassen, dass er diejenigen Mengen der verschiedenen Flüssigkeiten bestimmte, welche ein bestimmtes Stück einer thierischen Haut aufnehmen kann, für welche Constante er auch einen besonderen Namen, den der Quellungsmenge, vorschlug. Damit war zwar ein weiteres Mittel zur Untersuchung des Einflusses der Membran gegeben, aber erstens war doch durch den neuen Begriff die eigentlich bewegende Kraft in der Erscheinung nicht näher bezeichnet, und zweitens scheiterten auch hier die weiteren Untersuchungen an den immer ungleichen Wir-

---

[1]) On osmotic force, Phil. Trans. 1854, p. 177. Thomas Graham (20. December 1805 Glasgow — 16. September 1869 London), Professor der Chemie erst in Glasgow, dann in London, seit 1855 an J. Herschel's Stelle Münzmeister in London.

[2]) Für die folgenden Stoffe betragen z. B. die Steighöhen in derselben Röhre: Wasser 17,75 mm, 10 proc. Lösung von chlors. Kali 17,55 mm, 10 proc. Lösung von chlors. Natron 16,85, 1 proc. Oxalsäure 17,35, 1 proc. Schwefelsäure 16,35, 1 proc. Salzsäure 17,50.

[3]) Lhermite zeigte (Compt. rend. XXXIX, p. 1177; Ann. de chim. et de phys. (3) XLIII, p. 420), dass auch dieser Satz nicht allgemein gültig sei.

[4]) Liebig's Ann. d. Chem. CXXI, S. 78, 1862.

kungen der einzelnen Stücke selbst stofflich ganz gleicher Membranen. Allerdings neigten aus theoretischen Gründen viele Physiker zu der Ansicht, dass die Verschiedenheit der Wirkungen der Membranen oder der Quellungsmengen nur auf die verschiedene Porosität und also die diosmotischen ganz auf Capillar- und Diffusionserscheinungen zurückzuführen seien; schliesslich war auch das nur eine Zurückführung von Unbekanntem auf Unbekanntes, wenn die Idee auch für die Herstellung eines Zusammenhanges der Erscheinung werthvoll war.

Welche Schwierigkeiten selbst die freie Diffusion der Flüssigkeiten der Erklärungskunst dem Physiker bot, dafür zeugten wieder neue, sehr überraschende Beobachtungen Graham's [1]). Als Graham in ein grosses Gefäss mit Wasser ein offenes Glas setzte, welches mit den auf ihre Diffusion zu untersuchenden Lösungen gefüllt war, fand er, dass selbst gleich schwere Lösungen verschiedener Salze unter gleichen Umständen mit sehr verschiedenen Geschwindigkeiten diffundiren. Bei kohlensaurem Kalium und Natrium z. B. verhielten sich die in gleichen Zeiten und unter gleichen Umständen in das Wasser übergehenden Mengen wie 64 : 36, und für andere Salze waren die Ungleichheiten noch grösser. Dabei traten sogar schwache chemische Zersetzungen auf; aus saurem schwefelsaurem Kalium diffundirte nicht allein das Salz, sondern auch etwas freie Schwefelsäure, und Alaun zersetzte sich bei der Diffusion theilweise in seine beiden constitutiven Salze. Später [2]) entdeckte Graham, indem er bestimmte Lösungen mit einer Pipette auf den Boden eines mit Wasser gefüllten Gefässes brachte und kleine Mengen aus den obersten Flüssigkeitsschichten von Zeit zu Zeit auf ihren Gehalt an diffundirter Substanz untersuchte, dass gewisse organische, nicht krystallisirende Substanzen sich durch eine besonders geringe Diffusionsgeschwindigkeit auszeichnen. Dieselbe Concentration der oberen Wasserschichten, welche bei Salzsäure in 1 Tage eintrat, erreichte man bei Kochsalz in 2,33, bei Zucker in 7, bei schwefelsaurem Magnesium in 7, bei Eiweiss aber erst in 49 und bei Caramel gar erst in 98 Tagen. Graham theilte danach alle diffundirenden Flüssigkeiten in zwei Classen: die Krystalloid- und die Colloidsubstanzen. Gemische aus beiden trennen sich ihrer verschiedenen Diffusionsgeschwindigkeiten wegen schon bei der freien Diffusion, besonders leicht aber bei der Diffusion durch eine colloide Membran von einander. Graham empfahl darum die Dialyse vor Allem zur Reinigung von Colloiden.

In dieser Zeit hatte W. Schumacher [3]) abermals einen nicht unglücklichen Versuch gemacht, die Diffusion und danach auch die

---

[1]) On the diffusion of liquids, Phil. Trans. 1850, p. 1 u. 805, und 1851, p. 483.

[2]) Liquid diffusion applied to analysis, Phil. Trans. 1861, p. 183; ein Auszug (nach den Proc. of the Royal Soc.) findet sich auch in Pogg. Ann. CXIV, S. 187.

[3]) Pogg. Ann. CX, S. 337, 1860.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

Diosmose der Flüssigkeiten aus den Molecularkräften abzuleiten. Nach ihm haben alle Flüssigkeiten, wenn sie einen gewissen Grad von chemischer Anziehung auf einander ausüben, das Bestreben, sich vollständig zu mischen. Befinden sich nämlich in einer Flüssigkeit Molecüle einer anderen oder eines festen Körpers (eines gelösten Salzes), so erleiden diese Molecüle von der Flüssigkeit Anziehungen, die so lange nach verschiedenen Seiten hin ungleich sind, als nicht durch vollständige Mischung eine gleichmässige Vertheilung dieser Molecüle und damit ein gewisser Gleichgewichtszustand herbeigeführt worden ist. Sind die Flüssigkeiten durch eine poröse Wand geschieden, so wird die Mischung ebenfalls vor sich gehen, aber die Geschwindigkeit und Art derselben wird durch die Wand modificirt werden. Hat die Wand gegen eine der Flüssigkeiten eine stärkere Anziehungskraft, so wird die Geschwindigkeit dieser Flüssigkeit beschleunigt, und von derselben wird in einer bestimmten Zeit eine grössere Menge durch die Wand gehen als von der anderen. Dass danach alle Umstände, welche auf die Molecularanziehung einen Einfluss haben, auch die Erscheinungen der Osmose verändern, ist natürlich. Ebenso aber war es auch natürlich, dass man, bei der Unbestimmtheit der Molecularkräfte, vor Allem der zwischen festen Körpern und Flüssigkeiten wirkenden, dieser Theorie noch wenig Wichtigkeit beilegte. Die Diffusion und die Diosmose der Flüssigkeiten sind so complicirte Erscheinungen, dass man ohne vorhergängiges Studium der Molecularkräfte an einfacheren Erscheinungen wohl kaum das darin vorgehende Spiel der Kräfte erkennen wird.

Besser lag die Sache bei der Diffusion der Gase, wo man mehr und mehr von den Molecularkräften absehen lernte. Nach der neueren Gastheorie, die nun allmälig sich entwickelte, war die Diffusion verschiedener in Verbindung stehender Gase ein nothwendig geforderter Vorgang, dessen beobachtete, verhältnissmässige Langsamkeit man sogar als eine negative Instanz gegen die neue Gastheorie anführte. Bei der Diosmose der Gase (der Diffusion durch poröse Wände) dagegen zeigten sich wieder dieselben Schwierigkeiten wie bei den Flüssigkeiten. Graham hatte zwar, wie schon bemerkt, geglaubt, dass das Gesetz, welches er für die freie Diffusion aufgestellt, auch für die Diosmose gelte und dass also dieselbe geradeso wie der Ausfluss der Gase durch eine Oeffnung in dünner Wand geschehe. Doch fand Graham später[1]), dass selbst der Ausfluss der Gase durch capillare Röhren das Gesetz des freien Ausflusses nicht mehr befolge, dass die Geschwindigkeiten desselben nicht mehr den Quadratwurzeln aus den Dichten umgekehrt proportional seien, sondern auch von der specifischen Natur der Gase abhingen und mit dieser sich änderten. Jamin[2]), der im Jahre 1856 wieder den Durchgang von Gasen durch

---

[1]) On the motion of gases, Phil. Trans. 1849, p. 349.

[2]) Compt. rend. XLIII, p. 234; Pogg. Ann. XCIX, S. 327.

die Wände von Thonzellen beobachtete, kam dabei zu der Ueberzeugung, dass dieser Vorgang der Diosmose der Flüssigkeiten analog sei und einerseits von dem Filtrationsvermögen der beiden elastischen Flüssigkeiten und andererseits von einer Kraft abhänge, „die entweder die Affinität oder eine elektrische Action oder endlich eine einfache Molecularaction sein kann“. Am schärfsten aber sprach sich Bunsen in seiner berühmten Arbeit „Gasometrische Methoden“ (Braunschweig 1857) gegen die Anwendung des Graham'schen Diffusionsgesetzes auch auf die Diosmose der Gase aus. Er vertheidigte dem gegenüber die Meinung, dass die Gesetze der Diffusion der Gase durch poröse Wände den Gesetzen des Abflusses der Gase durch capillare Röhren ähnlich sein und ebenso wie von der besonderen Natur des Gases auch von der speciellen Beschaffenheit des Diaphragmas abhängen müssen. Alle diese neuen Ideen über die Bewegung der Flüssigkeiten führten dann einerseits zur Aufstellung des neuen Begriffs von der inneren Reibung der Flüssigkeiten und Gase, der in der nächsten Zeit eifrig behandelt und untersucht wurde, und drängten andererseits zu einer genaueren Erforschung der Adhäsion der Gase und Flüssigkeiten gegen feste Körper.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

Auch die letztere Untersuchung wurde erst in der nächsten Periode intensiver und allgemeiner in Angriff genommen; doch war man schon in dieser Periode von einer ganz merkwürdigen Seite her zur Beobachtung der bedeutenden Stärke und Haltbarkeit dieser Adhäsion von festen Körpern und Gasen wenigstens gekommen. In einer Abhandlung „Ueber den Process des Sehens und die Wirkungen des Lichtes auf alle Körper“ [1]) vom Jahre 1842 machte L. Moser auf die „wohl sehr lange bekannte Thatsache“ aufmerksam, „dass, wenn man auf einer gut polirten Glastafel mit gewissen Substanzen schreibt und die Tafel hierauf reinigt, die Charaktere jedesmal durch die Wasserdämpfe zum Vorschein kommen, wenn man darüber haucht, und dass dieselbe Erscheinung eintritt, wenn man eine Münze auf eine Glastafel legt, sie anhaucht und hierauf die Münze entfernt“. Da man dieselbe Wirkung auch erhält, wenn man die Münze nicht direct mit der Platte in Berührung bringt, sondern dieselbe der Platte nur bis auf eine kleine Entfernung nähert, so schrieb Moser die veränderte Adhäsion der Platte gegen die Wasserdämpfe überhaupt nicht unmittelbar der Berührung zu. Er brachte vielmehr jene Erscheinung mit der anderen in directe Verbindung, die bei der neu entdeckten Daguerrotypie so viel Aufsehen erregte, dass nämlich das Licht auf der Oberfläche einer polirten Silberplatte Veränderungen hervorbringen kann, die dem Auge direct nicht sichtbar, erst durch den ungleichmässigen Niederschlag von Quecksilber-

[1]) Pogg. Ann. LVI, S. 177. Ludwig Ferdinand Moser (22. August 1805 Berlin — 22. Februar 1880 Königsberg), Prof. d. Physik in Königsberg.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

dämpfen auf der Platte bemerkbar werden [1]. Zur Erklärung beider Erscheinungen nahm er dann an, dass das Licht, ebenso wie die Wärme, in den Körpern latent werden könne [2] und dass dieses Licht es sei, welches die Veränderungen der Adhäsion fester Körper gegen Gase und Dämpfe bewirke. Weil aber doch das unsichtbare Licht der Körper auf gegenüberstehende Metallplatten ganz anders einwirkt als das directe Sonnenlicht, so musste Moser dem Vorigen noch die recht unwahrscheinliche Voraussetzung zufügen, dass die unsichtbaren Lichtstrahlen, welche aus dem latenten Lichte der Körper hervorgehen, noch brechbarer sind, als selbst die ultravioletten des Sonnenlichtes und dass in dem letzteren eben jene Strahlen gänzlich fehlen [3].

Die Versuche Moser's riefen viel Enthusiasmus hervor, und manche Physiker meinten, dass seine Resultate „ebenso wichtig zu werden versprächen, als es Volta's Entdeckung der elektrischen Säule geworden ist" [4]. Gegen seine Theorie der neuen unsichtbaren Lichtstrahlen aber erhob sich doch bald recht kräftige und schliesslich erfolgreiche Opposition. Rob. Hunt schrieb die Hauchbilder nicht einem latent gewordenen Licht, sondern der latenten Wärme zu und setzte sogar der Photographie eine Thermographie entgegen [5]. Den gleichen Weg verfolgte auch E. Knorr, der sich in mehreren Abhandlungen ziemlich heftig gegen Moser's latentes Licht erklärte [6]. Fizeau aber behauptete noch im Jahre 1843 [7], dass weder Licht- noch Wärmestrahlen zur Erzeugung der Hauchbilder

---

[1] Moser scheint sogar erst durch die Bemühungen um die Erklärung der letzteren Erscheinungen zu seiner Untersuchung der Hauchbilder gekommen zu sein.

[2] Pogg. Ann. LVII, S. 1: „Ueber das Latentwerden des Lichtes." In einer Abhandlung im folgenden Bande von Poggendorff's Annalen (S. 108) kommt Moser zu einer Erklärung der merkwürdigen Bilder, die man an alten Gläsern beobachtet hat: Eine Folge, sagt er, der fortgesetzten Einwirkung des Lichtes ist die Thatsache, dass man an Gläsern, die sich lange Jahre, ohne berührt zu werden, über Kupferstichen befunden haben, weissliche Abbildungen dieser Stiche bemerkte. Prof. Meister theilt danach mit (Pogg. Ann. LIX, S. 638), dass in Freysing an Fensterscheiben, die ein Glaser bei armen Leuten eingesetzt, aber aus alt gekauftem Glas geschnitten hatte, plötzlich weissliche Figuren von Heiligenbildern sich zeigten. Er meint, dass auch diese, wie andere als Wunder angestaunte Bilder auf Glas ganz wie die Moser'schen Lichtfiguren zu erklären seien.

[3] Pogg. Ann. LVI, S. 569: „Ueber das unsichtbare Licht."

[4] Ibid. LVIII, S. 334.

[5] Phil. Mag. (3) XXI, p. 462 und Pogg. Ann. LVIII, S. 326: „Ueber Thermographie oder die Kunst, Zeichnungen und Druckschrift von Papier auf Metall mittelst Wärme zu übertragen."

[6] Pogg. Ann. LVIII, S. 320 und 563; LX, S. 18.

[7] Compt. rend. XV, p. 896 und XVI, p. 397; Pogg. Ann. LVIII, S. 592 und 594.

nöthig seien, sondern dass dieselben nur von einer Veränderung der Oberfläche der betreffenden Platten oder genauer nur von einer Veränderung der an den Platten immer haftenden Luftschichten herrührten. Erwin Waidele führte dann diese Ansicht durch überzeugende Versuche zu allgemeiner Anerkennung. Er entfernte beliebig durch Poliren mit ausgeglühter Holzkohle jede Luftschicht von einer Platte, oder imprägnirte dieselbe beliebig mit jeder Luftschicht, indem er die Oberfläche mit Pulver, welches die betreffende Luftart aufgesogen hatte, rieb. Er zeigte so, dass die Hauchbilder weder auftraten, wenn die betreffenden Körper beide von jeder adhärirenden Luftschicht frei, noch wenn sie beide mit ganz gleichen Atmosphären versehen waren, und dass also die Entstehung der Bilder nur auf die Verschiedenheit der Gasatmosphären der abzubildenden und der das Bild aufnehmenden Körper und auf die Veränderung dieser Atmosphären zurückgeführt werden könne [1]). Diese Theorie konnte dann auch zur Erklärung der von Karsten vor Allem um diese Zeit vielfach behandelten elektrischen Abbildungen dienen [2]). Auch für einige von Berzelius bemerkte, von A. Waller [3]) in vielen Versuchen beobachtete, merkwürdige Erscheinungen gab jene Theorie wohl eine genügende Erklärung. Wenn man nämlich eine gesättigte Salzlösung, z. B. von phosphorsaurer Ammoniak-Magnesia, auf eine Glastafel giesst und mit einer Feder Züge auf diese Tafel schreibt, so werden diese Züge beim Auskrystallisiren des Salzes durch Anhäufungen kleiner Krystalle sichtbar. Dabei blieb dann freilich für die Veränderung von jodirten Silberplatten in der Camera obscura immer noch unentschieden, in wie weit dieselbe von mechanischen Aenderungen der Oberfläche und in wie weit sie von chemischen Processen abhängig sei.

Wenn feste Körper und Flüssigkeiten an ihrer Oberfläche Gase verdichten, so ist anzunehmen, dass sie auch in das Innere Gase aufnehmen und je nach ihrer grösseren oder geringeren Porosität mehr oder weniger festhalten. Faraday hatte, wie schon erwähnt, die Absorption der Gase durch Platinschwamm zur Erklärung der katalytischen Wirkung benutzt. J. Jamin und Bertrand [4]) veröffentlichten 1853 ausgedehntere Versuche über die Absorption verschiedener Gase durch poröse

---

[1]) Pogg. Ann. LIX, S. 255. Moser bekämpfte nach Fizeau's Arbeiten diese mechanische Erklärung der Hauchbilder, welche seine Entdeckung ihres überraschenden Charakters scheinbar ganz beraubten, mit vielem Muthe; nach der Abhandlung von Waidele aber scheint er den Kampf als erfolglos aufgegeben zu haben. (S. Pogg. Ann. LX, S. 40 und 48.)

[2]) Pogg. Ann. LVII, S. 492; LVIII, S. 115; LX, S. 1. Noch in der letzten Abhandlung neigt Karsten zu der Ansicht, dass wohl alle die erwähnten Abbildungen, auch die Moser'schen, auf elektrische Kräfte zurückzuführen seien. Gust. Karsten, geb. am 24. November 1820 in Berlin, Professor der Physik in Kiel.

[3]) Phil. Mag. XXVIII, p. 94, 1846.

[4]) Compt. rend. XXXVI, p. 994, 1853.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

Körper oder Pulver, z. B. Glaspulver, Sand, Metalloxyde, Metallfeilspähne etc., aus denen hervorzugehen schien, dass wirklich die Absorption nur an den Oberflächen, den äusseren sowohl als den inneren, geschähe. Zu ähnlichen Resultaten war auch Magnus [1]) gekommen. Da aber die Grösse der Oberfläche bei porösen Körpern nicht bestimmt werden kann, so war auch hier vorläufig noch zu keinem sicheren Resultate zu gelangen. Noch complicirter lag die Sache bei Flüssigkeiten. Dalton hatte ausgesprochen, dass auch Flüssigkeiten die Gase ganz wie poröse Körper absorbiren; Graham [2]) aber hatte 1826 schon behauptet, dass die Absorption der Gase durch Flüssigkeiten gänzlich der Auflösung von Salzen in Wasser entspreche. Später zeigte sich, dass beide Arten der Absorption statthaben und dass die Wirkungen der einzelnen Ursachen schwer oder gar nicht von einander zu trennen sind. Die sehr zahlreichen und genauen Messungen, welche Bunsen in seinem schon erwähnten Werke „Gasometrische Methoden" [3]) veröffentlichte, ergaben, dass die Gase sich in zwei, allerdings in einander übergehende Gruppen theilten, von denen die eine eine schwache, die andere eine bei Weitem stärkere Absorption zeigt, und dass die zweite Gruppe wohl als in Wasser löslich betrachtet werden müsse. Ob aber diese Lösung ein rein physikalischer oder rein chemischer oder ein gemischter Vorgang sei, das war hier ebenso wenig als bei der Lösung der Salze auszumachen [4]). In Bezug auf das Verhältniss der Gasabsorption zum Druck bestätigte Bunsen das von Dalton und W. Henry [5]) aufgestellte Gesetz, nach dem die von den Flüssigkeiten bei verschiedenen Drucken, aber unter sonst gleichen Umständen absorbirten Gasmengen dem Drucke proportional sind, vorausgesetzt, dass die Gase und die Flüssigkeit nicht chemisch auf einander wirken. Die Abhängigkeit der Absorption von der Temperatur dagegen erwies sich als eine sehr complicirte und liess sich nur genähert durch einen Ausdruck von der Form $a - bt + ct^2$ darstellen. Die Wiederausscheidung des Gases aus der Flüssigkeit konnte durch Verminderung des Drucks, durch Einführen pulverförmiger, fester Körper, mit vollem Erfolge aber nur, wie das auch bei den an festen Körpern adhärirenden Luftschichten der Fall ist, durch bedeutende Erwärmung oder Kochen der Flüssigkeiten bewirkt werden.

---

[1]) Pogg. Ann. LXXXIX, S. 604, 1853.

[2]) Ann. of Phil. N. S. XII, 1826.

[3]) Auch schon Liebig's Ann. XCIII, S. 1, 1855.

[4]) Magnus sagt nur in der schon erwähnten Abhandlung (Pogg. Ann. LXXXIX, S. 610): „Daraus folgt, dass die Absorption wenigstens zum Theil auf einer Anziehung zwischen den Theilen des anziehenden festen oder flüssigen Körpers und denen des Gases beruht, und zwar auf einer der chemischen Anziehung analogen, die verschieden ist für die verschiedenen Substanzen."

[5]) Phil. Trans. 1803; Gilbert's Ann. XX, S. 147.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

Die vielfachen Beschäftigungen mit den Wirkungen der Adhäsion zwischen festen und flüssigen und gasförmigen Stoffen führten nun auch zu grösserer Aufmerksamkeit auf die Wirkungen der Adhäsion verschiedener Flüssigkeiten unter sich. Schon vielfach hatte man bei der Erzählung von den beruhigenden Wirkungen, welche Oel auf die Meereswellen ausübt, auf die merkwürdige Ausbreitung des Oels auf dem Wasser aufmerksam gemacht, aber diese Eigenschaft mehr bewundert als erklärt[1]). Untersuchungen von A. Fusinieri[2]), Frankenheim[3]) u. A. zeigten dann, dass sowohl die Ausbreitung als auch umgekehrt die Bildung stehender Tropfen einer Flüssigkeit auf einer anderen keine singuläre Eigenschaft, sondern vielen Flüssigkeiten eigenthümlich sei und also auch auf allgemeine Eigenschaften oder Molecularkräfte der Flüssigkeiten zurückgeführt werden müsse. Paul du Bois-Reymond[4]) vor Allen studirte in einer bedeutenden Arbeit vom Jahre 1854 die Verhältnisse, unter denen beim Aufgiessen einer Flüssigkeit auf eine andere entweder die Bildung stehender Tropfen, oder die Ausbreitung der zweiten auf der ersten, oder endlich auch die vollständige Mischung beider Flüssigkeiten erfolgt. Bei der Ausbreitung der Flüssigkeit entdeckte er auch neue, vorher noch nicht beobachtete Erscheinungen, die auf zusammenhängende Bewegungen der beiden betreffenden Flüssigkeiten hindeuteten. Als er in ein mit Wasser theilweise gefülltes Becherglas eine Oelschicht von 1 mm Dicke und darauf einen Tropfen Alkohol oder Aether goss, breitete sich dieser

---

[1]) Ein Zeugniss für das hohe Alter der Kenntniss von der Ausbreitung des Oels auf Wasser giebt eine Stelle in der Rechenkunst des Bhaskara Acharya, die um 1150 geschrieben ist: „Ein Funke der Wissenschaft, wenn er den verständigen Geist erreicht, dehnt sich aus durch seine eigene Kraft. Wie ein Tropfen Oel sich über das Wasser verbreitet, wie das Geheimniss, welches man dem Schlechten anvertraut, wie die Almosen, dem Würdigen gespendet, wenn sie auch klein sind, so verbreitet sich die Wissenschaft in dem entwickelten Geiste durch ihre eigene innere Kraft.“ (Nach Arneth, Geschichte der reinen Mathematik, Stuttgart 1852, S. 150.) Benj. Franklin, der zuerst die Beobachtung dieser Erscheinung wieder angeregt hat, schreibt in einem Briefe an Dr. Brownring vom 7. November 1773: „Bei diesen Versuchen setzte mich besonders ein Umstand in Erstaunen. Es war dies die plötzliche, weite und mächtige Ausbreitung eines Tropfen Oels auf dem Wasserspiegel, welche meines Wissens bisher von Niemand beobachtet worden war. . . . Es scheint, dass eine Abstossung zwischen seinen Theilchen stattfindet, und dass diese Abstossung so stark ist, dass sie auch auf andere auf der Oberfläche schwimmende Körper, als Stroh, Blätter, Spähne u. a. m., wirkt.“

[2]) Ann. delle scienze del Regno Lomb.-Ven. III, 1833.

[3]) Die Lehre von der Cohäsion. Breslau 1835.

[4]) Untersuchung über die Flüssigkeiten, über deren innere Strömungserscheinungen, über die Erscheinungen des stillstehenden Tropfens, deren Ausbreitung und Vertreibung, Berlin 1854. Ueber die Erscheinungen, welche die Ausbreitung von Flüssigkeiten auf Flüssigkeiten hervorrufen, Pogg. Ann. CIV, S. 193, 1858. Paul du Bois-Reymond, 1831—1889, Prof. a. d. technischen Hochschule in Charlottenburg.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

Tropfen schnell auf der Oelschicht aus, so dass er bald die Farben dünner Plättchen zeigte. Dabei entstand zu gleicher Zeit in dem Oel oben eine Vertiefung, und dem gegenüber erhob sich von unten in dem Wasser ein Berg, so dass oft an dieser Stelle die dünne Oelschicht ganz durchbrochen wurde. Du Bois-Reymond vermuthete, dass durch den sich ausbreitenden Alkohol auch das Oel mitgerissen werde; diese Oelströme müssten dann am Rande Strudel bilden und von da nach der Mitte zurückkehren, wobei aber, weil diese Ersetzungsströme den primitiven nicht an Stärke gleichkämen, in der Mitte eine Verminderung der Oelmenge und zugleich, weil die Oelströme durch Reibung auch einen Theil des Wassers mit sich führen würden, eine Vermehrung und Erhebung des Wassers, wie es die Erscheinung zeigt, eintreten müsste. Ueber die erste Ursache der Ausbreitung des Alkohols aber wusste er damals noch keine sichere Auskunft zu geben. Er liess es vielmehr unbestimmt, ob diese Ausbreitung von einer, bei genügend dünnen Schichten stark hervortretenden Abstossung der Flüssigkeitstheilchen oder nur von der Adhäsion zwischen dem Alkohol und dem Oel herrühre. Später, im Jahre 1870[1]), entschied er sich doch noch für die Annahme einer zwischen den Theilchen der Flüssigkeit wirkenden Abstossungskraft. Die meisten Physiker indessen mochten diese Abstossungskraft als eine elementare nicht gelten lassen und blieben dabei, die scheinbare Abstossung auf die Adhäsion und Cohäsion der Flüssigkeiten zurückzuführen. Eben vor der letzteren Arbeit Du Bois-Reymond's hatte R. Lüdtge[2]) festgestellt, dass zwischen zwei Flüssigkeiten, die sich auf einander ausbreiten sollen, die Adhäsion jedenfalls stärker sein muss, als die Cohäsion derjenigen von ihnen, welche die geringste Cohäsion besitzt. Wenn man dann beobachtet hat, dass die eine der Flüssigkeiten $A$ sich auf der Oberfläche der anderen $B$ zu einer dünnen Schicht ausbreitet, so ist daraus sicher zu schliessen, dass umgekehrt die Flüssigkeit $B$ sich auf $A$ nicht ausbreiten kann, sondern in Tropfenform darauf verharren muss, wie es in der That mit einem Wassertropfen auf Oel und umgekehrt mit einem Oeltropfen auf Wasser der Fall ist. Ein solcher auf einer anderen Flüssigkeit ruhender Tropfen überzieht sich aber mit einer dünnen Schicht dieser Flüssigkeit. Man kann die Flüssigkeiten, welche die Ausbreitung zeigen, in eine Reihe ordnen, in welcher jede Flüssigkeit sich auf jeder folgenden ausbreitet; die Geschwindigkeit der Ausbreitung scheint in einer einfachen Beziehung zu dem Abstande der Flüssigkeiten in dieser Reihe zu stehen. Die Bedingung, dass die Adhäsion der Flüssigkeiten grösser sein muss, als die kleinste ihrer Cohäsionen, scheint bei den meisten Flüssigkeiten erfüllt und die Erscheinung der Ausbreitung häufiger zu sein, als man sonst annahm. Nur das Quecksilber macht in dieser Beziehung eine Ausnahme. Seiner

[1]) Pogg. Ann. CXXXIX, S. 262.

[2]) Ibid. CXXXVII, S. 362, 1869.

bedeutenden Cohäsion nach sollte man erwarten, dass sich alle anderen Flüssigkeiten auf demselben ausbreiten, wie dies auch bei Oel, Benzin und Alkohol der Fall ist. Andere Flüssigkeiten, wie Wasser oder die Plateau'sche Seifenlösung, behalten aber auf Quecksilber ihre Tropfenform bei; der Grund davon scheint in der geringen Adhäsion derselben gegen das letztere zu liegen. Auf ähnliche Weise wie Lüdtge erklärten auch G. van der Mensbrugghe[1]) und C. Marangoni[2]) die Erscheinungen der Tropfenbildung und der Ausbreitung der Flüssigkeiten, die Beide auch den Begriff der Oberflächenspannung dabei in Betracht zogen. Der Letztere betonte, dass die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit wie bei der Berührung mit einem festen Körper so auch bei der Berührung mit einer anderen Flüssigkeit (durch die Adhäsion) vermindert werden muss und dass danach die Erscheinungen der Ausbreitung der Flüssigkeiten mit den Capillarerscheinungen in die gleiche Linie zu stellen sind.

Die bis hier erwähnten Wirkungen der Molecularkräfte zeigten je nach dem Aggregatzustande der betreffenden Stoffe so viele Verschiedenheiten, dass damit die alte Anschauung von den Aggregatzuständen als mehr oder weniger unabhängiger Urformen der Stoffe noch wohl zu vereinigen war. Doch wurden nun schon in dieser Periode Thatsachen bekannt, welche, dieser Anschauung entgegen, die Aggregatzustände mehr als zufällige, von äusseren Umständen abhängige, in einander übergehende Formen der Materie erscheinen liessen, eine Anschauung, die allerdings erst in der letzten Zeit zu grösserer Deutlichkeit gelangt ist. Faraday[3]) war anscheinend der Erste, der dieser Ansicht ein sicheres Fundament legte. Auf Anrathen Davy's erwärmte er im Anfange der zwanziger Jahre dieses Jahrhunderts in einer zugeschmolzenen Glasröhre das sogenannte Chlorhydrat, das sich beim Erwärmen in Chlor und Wasser zersetzt. Er bemerkte, nachdem diese Zersetzung genügend vorgeschritten, an den Wänden der Röhre ölartige Tropfen[4]), die beim Oeffnen der Röhre explosionsartig verschwanden und sich als flüssiges Chlor erwiesen. Unmittelbar darauf verflüssigte Davy[5]) selbst auf ähnliche Weise auch gasförmige Salzsäure, und Faraday gelang es danach[6]), noch eine Anzahl von Gasen durch Druck flüssig zu machen. Thilorier stellte zum

---

[1]) Mém. cour. et Mém. des sav. etc. de Brux. XXXIV, p. 1; Pogg. Ann. CXXXVIII, S. 323, 1869.

[2]) Pogg. Ann. CXLIII, S. 337, 1871.

[3]) On fluid chlorine, Phil. Trans. 1823, p. 160.

[4]) Dr. Paris trat zufällig in das Laboratorium, während Faraday an der Arbeit war, und spottete über den jungen Chemiker wegen des unvorsichtigen Gebrauchs von unreinen Gefässen. Am nächsten Morgen erhielt Paris die folgenden Zeilen: „Verehrter Herr! Das Oel, welches Sie gestern bemerkten, war nichts Anderes, als flüssiges Chlor. Ihr treu ergebener M. Faraday."

[5]) Phil. Trans. 1823, p. 164.

[6]) Ibid., p. 189.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

ersten Male im Jahre 1835[1]) in einer ⌃-förmigen, an beiden Enden zugeschmolzenen Glasröhre, deren einer Schenkel kohlensauren Kalk, deren anderer Schenkel Salzsäure enthielt, flüssige Kohlensäure in grösseren Mengen her. Er erhielt auch die Kohlensäure schon in fester Form und brachte durch Mischung derselben mit Aether vorher nie geahnte Kältegrade hervor. Natterer[2]) endlich ging dazu über, die Gase in einer schmiedeeisernen Flasche (nach Art der Windbüchsenflasche, wie er sagt) mit Hülfe einer Compressionspumpe zu comprimiren, und erhielt so auch flüssiges wie festes Stickstoffoxydul. Man verflüssigte dann weiter eine Menge bis dahin für permanent gehaltene Gase, aber einzelne, wie atmosphärische Luft, Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff, waren doch auf keine Weise in den flüssigen Zustand überzuführen. Als Thilorier, auf die Methode Davy's zurückgreifend, seine mit flüssiger Kohlensäure gefüllte schmiedeeiserne Flasche mit einer mit Wasserstoff gefüllten geschlossenen Glasröhre verband und dann die Flasche in kochendes Wasser senkte, wurde der Wasserstoff, wie ein zwischen Wasserstoff und Kohlensäure befindlicher Quecksilberindex anzeigte, auf $^1/_{480}$ seines ursprünglichen Volumens zusammengepresst, aber selbst dabei zeigte er noch keine Spur von Verflüssigung[3]). Man musste danach den Gedanken, alle Gase nur als Dämpfe von Flüssigkeiten mit äusserst niedrigen Siedepunkten zu definiren, wieder aufgeben und einige permanente Gase noch beibehalten[4]). Wenigstens vor der Hand, denn die Compressionsversuche zeigten doch, dass selbst diese permanenten Gase bei höheren Drucken dem Mariotte'schen Gesetze nicht mehr folgten und damit also den Charakter vollkommener Gase verloren. Uebrigens waren gegen die unbegrenzte Gültigkeit des Mariotte'schen Gesetzes schon mehrfach Zweifel erhoben worden. C. M. Despretz hatte 1827[5]) gezeigt, dass verschiedene Gase durch dieselben Drucke nicht in gleicher Weise comprimirt werden. Dulong und Arago fanden indessen, dass wenig-

---

[1]) Ann. de chim. et de phys. (2) LX, p. 427 und 432; Pogg. Ann. XXXVI, S. 141.

[2]) Pogg. Ann. LXII, S. 132, 1844. Joh. Aug. Natterer, geb. am 21. October 1813 in Wien, praktischer Arzt daselbst.

[3]) Nach Berthelot, Ann. de chim. et de phys. (3) XXX, p. 237.

[4]) Natterer sagt (Pogg. Ann. XCIV, S. 436): „Die früheren Versuche haben es beinahe zur Gewissheit gemacht, dass man durch blosse Anwendung des mechanischen Druckes kaum das gewünschte Ziel, nämlich die permanenten Gase in den flüssigen und festen Zustand überzuführen, je erreichen wird.“ Faraday aber, der 1845 wieder verschiedene Gase bei sehr niederen Temperaturen (bis — 110° C.) comprimirt hatte, sucht bestimmter die Ursache des Misserfolges darin, dass die Temperatur für die Verflüssigung der permanenten Gase immer noch zu hoch gewesen. (Phil. Trans. 1845, p. 155.) Er sagt wörtlich: „There are, in fact, some results producible by cold which no pressure may be able to effect.“ (Ibid., p. 157.)

[5]) Ann. de chim. et de phys. (2) XXXIV, 1827.

stens bei atmosphärischer Luft (über andere Gase konnten sie ihre Versuche nicht ausdehnen) das Gesetz innerhalb der Fehlergrenzen gültig sei. Regnault[1]) dagegen bewies dann sicher, dass doch auch bei den sogenannten permanenten Gasen das Volumen dem Druck nicht ganz proportional ist, und, wie schon früher bemerkt, behauptete er, dass Luft, Stickstoff etc. mit wachsendem Druck stärker, Wasserstoff aber weniger zusammengedrückt werden, als das Mariotte'sche Gesetz verlangt. Natterer[2]) fand mit seinem für die Condensation der Gase construirten Apparate, dass das Mariotte'sche Gesetz genügende strenge Gültigkeit zeigt, bei Wasserstoff bis zu einem Drucke von 78, bei Sauerstoff bis 77, bei Stickstoff bis 85, bei atmosphärischer Luft bis 96, bei Kohlensäure bis 12 Atmosphären, behauptete aber, entgegen den Regnault'schen Resultaten, dass alle Gase wenigstens insofern sich gleich verhalten, als bei starken Drucken alle Gase weniger zusammengedrückt werden, als das Mariotte'sche Gesetz es vorschreibt.

Die gleichen Schwierigkeiten wie die Behandlung der Capillarität, der Diffusion etc. bot auch die der Elasticität fester Körper, welche experimentell ebenfalls erst in diesem Zeitraume allgemeiner in Angriff genommen wurde. Die früheren Untersuchungen der Elasticität von Hooke, wie die verhältnissmässig umfassenden von s'Gravesande[3]) hatten mehr die Erforschung der relativen Gesetze der elastischen Wirkungen, als die Messungen der absoluten Grössen derselben zum Ziel. Das eigentliche Fundament für die letzteren legte erst Th. Young, indem er in der 13. Vorlesung seiner Lectures on natural philosophy (London 1807) als Elasticitätscoëfficienten dasjenige Gewicht definirte, welches einen Stab von dem Querschnitte 1 um seine eigene Länge zu verlängern vermag. Neu angeregt wurden dann die experimentellen Untersuchungen wohl durch die immer dringender werdenden Anforderungen der Technik, durch die schon erwähnten theoretischen Erörterungen der grossen Mathematiker Poisson und Cauchy und endlich zuletzt auch durch das immer wachsende Interesse der Physiker für die Wirksamkeit der Molecularkräfte. Sorgfältige, exacte Messungen der Elasticität des Eisens veröffentlichte Lagerhjelm noch im Jahre 1827[4]). Er beobachtete den Elasticitätscoëfficienten einmal direct und berechnete ihn dann auch aus den Longitudinaltönen der betreffenden Eisenstäbe. Seine Resultate stimmten mit Poisson's Deductionen darin überein, dass die Quercontraction bei der Ausdehnung von Drähten

---

[1]) Mém. de l'Acad. XXI; Pogg. Ann. LXVII, S. 534.

[2]) Pogg. Ann. XCIV, S. 436, 1855.

[3]) Elemens de physique, Leyden 1746, I, p. 346—376.

[4]) Försök att bestämma valsadt och smidt jerns täthet, jemnhet, smidbarhet och styrka, Stockholm 1827. Pehr Lagerhjelm (13. Februar 1787 Falkenä — 18. Juli 1856 Bofors, Örebro Län), Bergamtsassessor in Stockholm.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

und Stäben die Längendilatation nicht vollständig compensirt und dass das Eisen beim Zug eine Volumenvergrösserung erfährt, durch welche das specifische Gewicht desselben von 7,821 auf 7,777 vermindert wird. Die relativ vollständigsten Messungen der Elasticität aber unternahm in den Jahren von 1844 bis 1860 W. Wertheim [1]. 1844 [2] gab er in drei Abhandlungen für verschiedene Metalle und Metalllegirungen Tafeln der durch directe Belastung wie aus Longitudinal- und Transversalschwingungen erhaltenen Elasticitätscoëfficienten, der Elasticitätsgrenzen (das sind die Gewichte, welche an einem Stabe von 1 qmm Querschnitt eine bleibende Verlängerung von 0,00005 seiner Länge erzeugen), der grössten bleibenden Verlängerungen vor dem Zerreissen, der Gewichte, welche bei langsamer oder schneller Belastung das Zerreissen bewirken, und endlich der aus den Longitudinaltönen berechneten Schallgeschwindigkeiten. Als allgemeine Resultate seiner Untersuchungen fand er unter anderen, dass die Elasticitätscoëfficienten durch dieselben Umstände wie die Dichte verändert werden, dass man aus Longitudinal- wie Transversaltönen für diese Coëfficienten dieselben Werthe und etwas grössere als durch Beobachtung der directen Verlängerung erhält, dass auch die geringste Belastung eine bleibende Verlängerung erzeugt und dass die grösstmöglichste Ausdehnung wie auch die Festigkeit bei langsamem Belasten grösser sind als bei schnellem. Diesen Untersuchungen folgten 1846 [3] Messungen der Elasticität und Festigkeit der Hölzer und 1847 [4] verschiedener Glassorten, die Wertheim mit Chevandier gemeinschaftlich anstellte. Nach der letzteren Arbeit ist die Dichte derselben Glassorten gleich, ob sie gegossen oder geblasen sind, bei gekühltem Glase aber um 0,0045 grösser als bei ungekühltem, woraus folgt, dass bei ungekühlten Gläsern die inneren Schichten sich in gewaltsam ausgedehntem Zustande befinden müssen. Der Elasticitätscoëfficient wächst mit der Dichte des Glases und wird durch Berechnung aus den Tönen der Gläser grösser als durch directe Beobachtung erhalten. In demselben Jahre [5] veröffentlichte Wertheim Untersuchungen über die Elasticität der hauptsächlichsten Gewebe des menschlichen Körpers und im folgenden [6] dann die schon früher erwähnten Experimente über das Verhältniss der Längendilatation zur Quercontraction, dessen Veränder-

---

[1] Wilhelm Wertheim (22. Februar 1815 Wien — 20. Januar 1861 Tours), seit 1855 Examinator an der polytechnischen Schule in Paris.

[2] Pogg. Ann. LVII, S. 382, Ergänzungsbd. II, S. 1 und 73.

[3] Ibid., Ergänzungsbd. II, S. 481.

[4] Ibid., S. 115.

[5] Ann. de chim. et de phys. (3) XXI, p. 385, 1847; auch schon Compt. rend. XXII, p. 1151, 1846.

[6] Ann. de chim. et de phys. (3) XXIII, p. 52, 1848.

lichkeit später von Kirchhoff[1]), Koosen[2]), Okatow[3]) u. A. festgestellt wurde. 1854[4]) stellte er verschiedene Thesen über die Beziehungen der Elasticität der Mineralien zu ihrer chemischen Zusammensetzung auf, die aber zu wenig sicheren Resultaten führten. Dagegen behandelte er 1857 wieder in sehr umfassender Weise die Torsionselasticität[5]), indem er die Abhängigkeit des Torsionswinkels direct, nicht wie Coulomb indirect aus der Geschwindigkeit der Torsionsschwingungen, bestimmte. Wertheim's letzte Abhandlungen betreffen die cubische Compressibilität der festen Körper sowie die Biegungselasticität. Mit der letzteren aber beschäftigte sich in mehreren Arbeiten[6]) besonders eingehend Saint-Venant, der auch über die Torsionselasticität bedeutende Abhandlungen veröffentlichte.

Mechanik, c. 1840 bis c. 1860.

Theoretisch und systematisch wurde die Elasticität, so vollständig als es zur Zeit möglich war, behandelt von Lamé in seinen Leçons sur la théorie de l'élasticité (Paris 1852), Clebsch in seiner Theorie der Elasticität fester Körper (Leipzig 1862) und Beer in der Einleitung in die mathematische Theorie der Elasticität (Leipzig 1869).

Die **Undulationstheorie des Lichtes** war in der vorigen Periode zu allgemeiner Anerkennung gelangt. Die von Fresnel, Schwerd und Cauchy entwickelten Formeln zeigten in so vielen Fällen eine so genaue Uebereinstimmung mit den Beobachtungen, dass ein Zweifel an der Theorie nicht mehr möglich war. Doch konnte dabei weiterblickenden Geistern nicht verborgen bleiben, dass auch auf der Grundlage der Undulationstheorie die mathematische Deduction der Erscheinungen an manchen Stellen und gerade bei den gewöhnlichsten, alltäglichsten Erscheinungen auf Schwierigkeiten stosse. Welche Mühe es machte, die bei der Brechung des Lichtes auftretende Farbenzerstreuung auch nur ihrer Möglichkeit nach zu erklären, haben wir schon erwähnt. Wie Cauchy diese Möglichkeit erwies, wie er fortdauernd bestrebt war, seine Formeln in immer grössere Uebereinstimmung mit den Resultaten der Messungen zu bringen, wie andere bedeutende Physico-Mathematiker bis in die neueste Zeit sich bemühten, seine Ideen weiter zu entwickeln oder zu berichtigen, haben wir ebenfalls schon angedeutet. Aber ausser diesem Problem der Farbenzerstreuung blieben für die Undulationstheorie noch einige andere Reste in der Optik, die den Mathematikern viel zu schaffen machten.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

---

[1]) Pogg. Ann. CVIII, S. 369.
[2]) Ibid. CI, S. 401.
[3]) Ibid. CXIX, S. 11.
[4]) Cosmos (par Moigno) IV, p. 518.
[5]) Ann. de chim. et de phys. (3) L, p. 202.
[6]) Ausführlich in Liouville's Journal (2) I, p. 89, 1856. A. J. Cl. Barré de Saint-Venant, 1797—1886, Prof. a. d. Ecole des Ponts et Chaussées in Paris.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

Schon für die Emanationstheoretiker war es eine ungelöste Aufgabe geblieben, zu erklären, warum bei der Reflexion des Lichtes immer nur ein Theil desselben reflectirt, ein anderer Theil aber in den reflectirenden Körper aufgenommen wird. Young hatte diesen Misserfolg als einen Grund gegen die Emanationstheorie aufgeführt und für diese Theorie geradezu die Möglichkeit einer Lösung des Problems geleugnet. Bald aber zeigte sich, dass die Undulationstheorie hier ganz gleichen Schwierigkeiten begegne.

Fresnel hatte zur Erklärung der Reflexion des Lichtes an durchsichtigen Körpern die nicht gerade zwingenden Annahmen gemacht, dass der Aether in den Körpern von grösserer Dichte, aber von gleicher Elasticität wie ausserhalb derselben sei und dass die Dichtigkeitsveränderung sprungweise an einer bestimmten Fläche erfolge, an der auch die Reflexion wie die Brechung geschehe [1]). Indem er dann noch voraussetzte, was bei Vernachlässigung der Absorption des Lichtes in den Körpern natürlich war, dass die lebendigen Kräfte des gebrochenen und des reflectirten Lichtstrahls zusammen der lebendigen Kraft des auffallenden Lichtstrahls gleich sein müssten, konnte er ableiten, dass für einen gewissen Reflexionswinkel (den Polarisationswinkel) alles in der Einfallsebene polarisirte Licht ganz reflectirt und alles senkrecht dazu polarisirte ganz durchgelassen werden müsste, und konnte die Intensitäten dieser Lichtstrahlen berechnen. Ebenso konnte er dann auch für jeden beliebigen Einfallswinkel die Intensitäten der beiden senkrecht zu einander polarisirten reflectirten wie der beiden senkrecht zu einander polarisirten gebrochenen Strahlen angeben [2]). Die betreffenden Formeln stimmten mit den vorhandenen Beobachtungen von Malus, Brewster u. A. genügend überein. Doch zeigten sich auch schon damals einzelne Abweichungen. Brewster [3]) hatte 1815 und A. Seebeck [4]) 1830 gefunden, dass nicht bei allen Substanzen das unter dem Polarisationswinkel polarisirte Licht vollständig in einer Ebene polarisirt

---

[1]) Wenn wir, wie es gewöhnlich geschieht, eine Anziehung der ponderablen auf die Aethermolecüle annehmen, so erscheint eine grössere Dichte des Aethers in den Körpern ganz folgerichtig; die hiernach wahrscheinlich werdende Vergrösserung der Elasticität des Aethers in den Körpern könnte man sich allenfalls durch eine von der Anziehung herrührende schwerere Beweglichkeit der Aethermolecüle neutralisirt denken. Für die entgegengesetzten Annahmen einer grösseren Elasticität des Aethers in den Körpern bei gleicher Dichte, aus denen Franz Neumann (Abh. der Berliner Akad. 1835) die Fresnel'schen Formeln ebenfalls ableitet, scheint es schwerer, irgend welche plausiblen Gründe anzugeben.

[2]) Ann. de chim. et de phys. (2) XVII, p. 190 und 312, 1821 und XLVI, p. 225, 1831; Pogg. Ann. XXX, S. 255 und Ergänzungsbd. II, S. 332.

[3]) Phil. Trans. 1815, p. 125.

[4]) Pogg. Ann. XX, S. 27.

sei. Airy[1]) schloss 1833 daraus, dass bei manchen Substanzen das Licht durch Reflexion überhaupt nicht geradlinig, sondern elliptisch polarisirt werde oder dass die beiden senkrecht zu einander polarisirten reflectirten Lichtstrahlen eine Phasendifferenz besässen, was aber nach der Fresnel'schen Annahme der Reflexion an einer Fläche unmöglich und mit seinen Formeln auch nicht vereinbar erschien. Damals hielt man diese Phänomene noch für Ausnahmen, am Ende der vierziger Jahre aber constatirte J. C. Jamin[2]), dass sie die Regel bildeten. Er zeigte durch sichere Versuche, dass bei der Reflexion des Lichtes an durchsichtigen Körpern ganz allgemein (wie man es bei der Metallreflexion schon früh erkannt) eine Verzögerung des einen reflectirten Strahls gegen den senkrecht dazu polarisirten und damit eine Verschiebung der Schwingungsphasen auftritt und dass somit alles reflectirte Licht nicht geradlinig, sondern elliptisch polarisirt wird. Jamin bestimmte auch die durch Reflexion erzeugte Grösse des Phasenunterschiedes für viele Substanzen und bemerkte dabei, dass nicht immer der in demselben Sinne polarisirte Strahl gegen den anderen in der Phase zurückbleibt, sondern dass dieses Zurückbleiben von der reflectirenden Substanz abhängt, so dass im Allgemeinen bei den stärker lichtbrechenden Substanzen der senkrecht gegen die Einfallsebene polarisirte Strahl, sonst aber der andere Strahl verzögert wird, während allerdings auch bei einigen Körpern überhaupt keine Verzögerung und damit auch keine elliptische Polarisation eintritt[3]). Cauchy[4]) versuchte in seiner Reflexionstheorie auch diesen Erscheinungen gerecht zu werden, und Jamin erkannte ausdrücklich an, dass die Cauchy'schen Formeln mit der Erfahrung genügend übereinstimmten und jedenfalls den Fresnel'schen gegenüber (die allerdings, weil die Elliptīcität des reflectirten Lichtes nur gering ist, immer näherungsweise gültig bleiben) als die einzigen, welche eine genügende Lösung des

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

---

[1]) Phil. Mag. (3) I, p. 25, 1833; Pogg. Ann. XXVIII, S. 83.

[2]) Jules Célestin Jamin (30. Mai 1818 Termes, Dép. Ardennen — 12. Februar 1886 Paris), Professor der Physik an der École polytechnique u. a. d. Sorbonne in Paris.

[3]) Compt. rend. XXII, p. 477; XXVI, p. 383; XXVII, p. 147; Ann. de chim. et de phys. (3) XXIX, p. 263, 1850: Mém. sur la réflexion à la surface des corps transparents.

[4]) Compt. rend. VIII, p. 560; IX, p. 729, 1839; XXVIII, p. 124, 1849; XXXI, p. 160 u. f. Eine einfachere und verständlichere Darstellung der schwer zu durchdringenden Cauchy'schen Reflexionstheorie gab A. Beer in Band XCI und XCII von Poggendorff's Annalen. Aehnliche Ableitungen sind weiter auch von Eisenlohr (Pogg. Ann. CIV, S. 346), Lundquist (Pogg. Ann. CLII, S. 177, 398 und 565) u. A. gegeben worden. James Walker (An. acc. of Cauchy's Theory of Reflection a. Refraction of Light, Phil. Mag. (5) XXIII, p. 151) unterscheidet drei verschiedene Stufen in der Entwickelung von Cauchy's Lichttheorie (1830, 1836 und 1839), von denen die folgende immer die vorhergehende aufhebt.

Optik, c. 1840 bis c 1860.

Problems der Reflexion liefern, anzusehen seien[1]). Cauchy's Reflexionstheorie ruhte auf der Vorstellung, dass an der Trennungsfläche der beiden Medien auch longitudinale Wellen entstehen, die allerdings mit der Entfernung von dieser Fläche rasch an Intensität abnehmen und in unmessbarer Entfernung schon verschwinden. Die Physiker haben indessen diese Vorstellung meist wieder fallen lassen, und man hat sich danach meist bemüht, die Reflexionstheorie des Lichtes auf der natürlicheren Annahme aufzubauen, dass die Dichte des Aethers an der Grenze der Medien sich nicht sprungweise, sondern continuirlich ändere und dass also die Reflexion wie die Brechung des Lichtes nicht an einer Fläche geschehe, sondern sich allmälig entwickele. Freilich scheint dieser Aufbau, wie ihn Lorenz[2]) u. A. versucht haben, auch noch nicht vollständig gelungen.

Mit der Annahme einer allmäligen Entwickelung der Brechung liessen sich nun leichter auch die Erscheinungen bei der totalen Reflexion des Lichtes vereinigen. Newton, der überhaupt an der Grenze zweier optisch verschiedenen Medien immer eine dünne Uebergangsschicht voraussetzte, nahm schon bei der totalen Reflexion einen Eintritt des Lichtes aus dem dichteren Mittel in das dünnere an, aus dem aber durch die stärkere Anziehung des ersteren das Licht noch wieder in das dichtere Mittel zurückgezwungen würde; ja er bestimmte sogar den Weg, welchen das Licht dabei in dem dünneren Mittel beschrieb, als den Zweig einer Parabel[3]). Seiner Meinung schlossen sich natürlich die Anhänger der Emanationstheorie ohne Weiteres an; aber auch Huyghens[4]) und seine Nachfolger gaben das Eindringen des Lichtes in das dünnere Medium zu, obgleich ihnen die Erklärung der Rückkehr der Wellenbewegung in das dichtere Medium schwerer als den Emanationstheoretikern werden musste. Young[5]) half sich mit der Annahme, den Theilchen des dünneren Mediums werde die Bewegung nur theilweise mitgetheilt, so aber, dass diese Mittheilung den Erfolg hätte, dass diese Theilchen einem weiteren Eindringen der Undulationen widerständen. Fresnel[6]) entdeckte im total reflectirten Lichte eine Verzögerung des einen geradlinig polarisirten Lichtstrahles gegen den dazu senkrecht polarisirten um $^1/_8$ der Wellenlänge und versuchte danach, das tiefere Eindringen des einen Strahls in das dünnere Mittel aus seinen Formeln herauszulesen. Diese Formeln gaben beim Uebergang in ein dünneres Mittel bei gewissen Grössen des Einfallswinkels complexe Werthe für die Amplituden des reflec-

---

[1]) Ann. de chim. et de phys. (3) XXX, p. 264.
[2]) Pogg. Ann. CXI, S. 460, 1860.
[3]) Princ. math., 2. Aufl., 1713, p. 206.
[4]) Traité de la lumière 1690, p. 38.
[5]) Lectures on nat. phil., London 1807, II, p. 623.
[6]) Ann. de chim. et de phys. (2) XXIX, p. 175, 1825; XLVI, p. 241, 1831.

tirten Lichtes. Fresnel behauptete dann, dass das Imaginäre hier so zu verstehen sei, dass der betreffende Theil des Lichtes nicht mehr, wie bei der Rechnung vorausgesetzt, an der Trennungsfläche der beiden Medien, sondern weiter hinter dieser Fläche reflectirt werde. Quincke [1]) aber wies später durch genaue Messungen nach, dass das Eindringen des Lichtes in das innere Medium bei der totalen Reflexion auf eine Strecke von mehreren Wellenlängen sich steigern kann und dass diese Tiefen im Allgemeinen für senkrecht zur Einfallsebene polarisirtes Licht grösser sind, als für das in der Einfallsebene polarisirte.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

Wie die Theorie der Reflexion, zeigte nun auch die der Aberration des Lichtes Schwierigkeiten gerade da, wo man bis jetzt genügend sichere Erklärungen gehabt zu haben glaubte. Wie seit den ersten Zeiten ihrer Entdeckung hatte man noch immer die Aberration durch das Beispiel eines sich geradlinig mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortbewegenden Steines demonstrirt, der durch eine Röhre hindurchfliegt, die wieder eine selbständige, seitliche Bewegung besitzt. Die nothwendige Voraussetzung zur Anwendung dieser Erklärung auf die Aberration war, dass das von den Sternen ausgehende Licht auch im Bereiche der bewegten Erde nicht von der geradlinigen Fortpflanzungsrichtung abweiche. Diese Voraussetzung war wohl für die Emanationstheorie, aber keineswegs für die Undulationstheorie von genügender Wahrscheinlichkeit; denn es liess sich wohl denken, dass ein Strom von Lichtmolecülen ohne Störung durch die Atmosphäre der bewegten Erde hindurchgehe; dass aber in gleicher Weise die von den Sternen ausgehende Wellenbewegung des Aethers sich ohne Aenderung der Fortpflanzungsrichtung in dem in der bewegten Erde enthaltenen Aether fortsetze, war jedenfalls nicht ohne Weiteres anzunehmen. Stokes [2]) behauptete denn auch im Jahre 1846, dass die Fortpflanzung des aus dem Himmelsraume kommenden Lichtes in dem bewegten Aether der Erde unmöglich eine geradlinige bleiben könne und dass danach die gewöhnliche Erklärung der Aberration nicht mehr anwendbar sei. Challis [3]) wandte dagegen ein, dass man umgekehrt aus der vollständigen Uebereinstimmung der alten Theorie der Aberration mit den Resultaten der Beobachtung auch auf die Richtigkeit der Voraussetzung jener Theorie schliessen und eine von der Bewegung der Körper unabhängige Fortpflanzung des Lichtes in

---

[1]) Pogg. Ann. CXXVII, S. 1 und 199, 1866.

[2]) Phil. Mag. (3) XXVII, p. 9, 1846 u. f.

[3]) Ibid. XXVII, p. 321 u. f. Stokes, der mit Challis überhaupt manche wissenschaftliche Kämpfe ausfocht, hatte mit diesem auch über die Theorie der Aberration einen länger andauernden Streit. James Challis (12. December 1803, Braintree, Essex — 3. December 1882, Cambridge), Geistlicher, Professor der Physik und Astronomie.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

ihnen annehmen müsse. Fizeau betonte, dass man drei Hypothesen über das Verhältniss des in einem Körper enthaltenen Aethers zu der Bewegung desselben machen könne: 1) der Aether ist an die Molecüle der Körper unzertrennlich gebunden und bewegt sich gänzlich mit denselben, oder 2) der Aether ist vollständig frei und wird durch die Bewegungen der Körper selbst nicht afficirt, und 3) der Aether ist nur in einem Theile an die Bewegung der ponderablen Molecüle gebunden und zum anderen Theile vollständig frei. Zur Entscheidung zwischen diesen drei Hypothesen stellte Fizeau neue, sehr sinnreiche Experimente an [1]. Jedes von zwei Lichtbündeln, die derselben Quelle entstammten und schliesslich zur Interferenz gebracht wurden, durchlief auf seinem Wege eine mit Wasser gefüllte Röhre. Die beiden Röhren waren gleich lang, in der einen aber bewegte sich das Wasser mit einer ziemlich beträchtlichen, gleichförmigen Geschwindigkeit in der Richtung der durch die Röhren gehenden Lichtstrahlen, während es in der anderen diesen Strahlen mit derselben Geschwindigkeit sich entgegen bewegte. Mit Ausnahme dieses Umstandes durchliefen die beiden Lichtbündel vor der Interferenz ganz gleiche Wege und waren genau denselben Bedingungen unterworfen. Fizeau beobachtete dann, dass die entstehenden Interferenzstreifen gegen dasjenige Streifensystem verschoben erschienen, welches entstand, wenn das Wasser in den Röhren in Ruhe blieb, und zwar geschah die Verschiebung immer nach der Seite desjenigen Lichtstrahls hin, der sich dem Wasser entgegen bewegte. Er hielt danach die dritte der oben erwähnten Hypothesen für die wahrscheinlich richtigste, wonach der in einem bewegten Körper enthaltene Aether zum Theil der Bewegung sich anschliesst und zum Theil in Ruhe bleibt. Da er aber bei der Ersetzung des strömenden Wassers in den Röhren durch strömende Luft keine Verschiebung der Interferenzstreifen beobachten konnte, so schloss er, dass bei Gasen der Einfluss ihrer Bewegung auf den in ihnen enthaltenen Aether ein unmessbar geringer ist, und danach darf allerdings die alte Theorie der Aberration, bei der es sich vor Allem um die Bewegung des Lichtes in Luft handelt, auch fürderhin in Geltung bleiben [2]. Der Ansicht von Fizeau schloss sich

---

[1] Compt. rend. XXXIII, p. 349, 1851; Pogg. Ann., Ergänzungsbd. III, S. 457. Hippolyte Fizeau, geb. am 23. September 1819 in Paris, seit 1863 Inspecteur de physique an der École polytechnique.

[2] Fizeau hat später auch den Einfluss der Bewegung fester Körper auf den in ihnen enthaltenen Aether untersucht. Nach Malus, Biot und Brewster erleidet die Polarisationsebene eines polarisirten Lichtstrahls beim Durchgange durch eine geneigte Glasplatte eine Drehung, die unter Anderem vom Brechungsindex und somit auch von der Geschwindigkeit des Lichtes abhängt. Fizeau liess nun Lichtstrahlen durch eine von parallelen Flächen begrenzte Platte einmal so gehen, dass die Bewegung des Lichtes mit derjenigen, welche die Platte durch die Drehung der Erde erhielt, übereinstimmte, ein anderes Mal so, dass die beiden Bewegungen entgegengesetzt gerichtet waren.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

Beer[1]) ganz an, nur meinte er, was allerdings auf dasselbe hinauskommt, dass nicht ein Theil nur des Aethers die Bewegung der ponderablen Molecüle mitmacht, sondern dass der ganze Aether, aber nur mit einem Bruchtheil der Geschwindigkeit der schweren Massen bewegt wird. Ist die Geschwindigkeit des bewegten Körpers $v$, so setzte er die des in ihm enthaltenen Aethers gleich $u\,v$ und nannte $u$ den Correptionscoëfficienten der betreffenden Substanz. Er fand dann $u = 1 - \frac{1}{n^2}$, wo $n$ der absolute Brechungsexponent, und berechnete für Wasser $u = 7/16$, für Luft aber nur $u = 0{,}000\,589$ [2]).

Die vorerwähnten Experimente Fizeau's hatten ihre Anregungen jedenfalls aus den Versuchen empfangen, die von ihm selbst und Anderen in dieser Zeit angestellt wurden, um die irdische Geschwindigkeit des Lichtes zu messen. Arago hatte im Jahre 1838, bald nach Wheatstone's Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektricität, darauf aufmerksam gemacht, dass man mit Hülfe des rotirenden Spiegels, wenn vielleicht auch nicht die absolute Geschwindigkeit des Lichtes bestimmen, so doch die relativen Geschwindigkeiten desselben in verschiedenen Medien mit einander vergleichen könne. Nimmt man, so sagt er[3]), als leuchtenden Gegenstand einen elektrischen Funken, der der Rotationsachse des Spiegels parallel ist, und stellt eine 28 m lange, mit Wasser gefüllte Röhre so, dass das Licht von der Hälfte der leuchtenden Linie durch diese Röhre gehen muss, um zum Spiegel zu gelangen, während die andere Hälfte parallel der Röhre durch die Luft geht, so müsste, wenn die Rotationsachse vertical und die Wasserröhre den oberen Theil der leuchtenden Linie aufnimmt, diese Linie nach der Emanationstheorie die Form ⊢┐, nach der Undulationstheorie aber die Form ┌⊣ zeigen. Ein Entscheid zwischen diesen beiden Theorien wäre so sicher zu treffen. Arago führte seinen Vorschlag nicht selbst aus, weil seine Augen so difficile Beobachtungen nicht mehr erlaubten, und erst 1850 konnte er der Pariser Akademie melden, dass Foucault seinen Plan in Ausfüh-

---

Die beobachteten Drehungen der Polarisationsebene zeigten dann wirklich eine deutliche Abhängigkeit von der Bewegung der Erde, wenn auch die numerischen Resultate ziemlich von einander abwichen. (Compt. rend. XLIX, p. 717, 1859; Pogg. Ann. CIX, S. 160, und Ann. de chim. et de phys. (3) LVIII, p. 129, 1860; Pogg. Ann. CXIV, S. 554.) Faye (Compt. rend. XLIX, p. 870; Pogg. Ann. CIX, S. 170) meinte, dass Fizeau bei diesen Darlegungen den Einfluss der Eigenbewegung des Sonnensystems übersehen; Tessan (Compt. rend. XLIX, p. 980) aber entgegnete, dass diese Eigenbewegung ohne Einfluss sein müsse, weil das Sonnenlicht ebenfalls diese Bewegung in sich habe.

[1]) Pogg. Ann. XCIII, S. 213. Aug. Beer (31. Juli 1825 Trier — 18. November 1863 Bonn), Prof. der Mathematik und Physik in Bonn.

[2]) Ibid., S. 217.

[3]) Compt. rend. VII, p. 954, 1838; Pogg. Ann. XLVI, S. 28.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

rung bringen werde [1]). Foucault [2]) theilte dann auch bald darauf mit, dass seine Versuche vollständig gelungen und dass er nach Arago's Methode eine Verzögerung der Lichtgeschwindigkeit im Wasser gegen die in der Luft sicher constatirt und somit die Undulationstheorie direct bestätigt habe. Gleich darauf machten auch Fizeau und Breguet [3]) bekannt, dass sie auf ähnliche Weise zu dem principiell gleichen Ergebnisse gekommen seien.

Fizeau aber hatte schon im Jahre vorher, indem er statt des rotirenden Spiegels ein rotirendes Zahnrad anwandte, einen Apparat construirt, mit dem er nicht blos die relative, sondern vielmehr die absolute Geschwindigkeit des Lichtes messen konnte [4]). Die Fernrohre des bekannten Apparates waren 8633 m von einander entfernt; das Zahnrad hatte 720 Zähne. Das Licht erlosch, wenn die Rotationsgeschwindigkeit des Rades auf 12,6 Umdrehungen in einer Secunde gesteigert wurde; bei der doppelten Geschwindigkeit erschien es wieder und bei der dreifachen erlosch es abermals, was der Deduction der Erscheinungen eine besondere Sicherheit verlieh. Fizeau fand aus 28 Messungen als wahrscheinlichsten Werth für die Geschwindigkeit des Lichtes 70948 Lieues oder 42569 geographische Meilen, ein Werth, der jedenfalls etwas zu gross war. Foucault [5]) gelang es 13 Jahre später, mit einem Apparate, der wieder mit dem Arago'schen rotirenden Spiegel versehen war, die Geschwindigkeit des Lichtes im Zimmer zu messen, indem er den Weg desselben durch Reflexion an fünf Concavspiegeln bis auf 20 m vergrösserte. Er erhielt dabei den bis auf den 500. Theil wahrscheinlich genauen Werth 298000 km oder 39136 geographische Meilen (für den luftleeren Raum). Mit diesem Resultate stimmten dann auch zahlreiche neuere Messungen recht gut überein. A. Cornu [6]) erhielt 1873 mit einem verbesserten Fizeau'schen Apparate 298500 km und im nächsten Jahre 300330 km. Albert Michelson [7]) fand 1878 nach einer verbesserten Foucault'schen Methode 299954 ± 50 km und J. Young und G. Forbes [8]) erhielten 1881 wieder nach Fizeau'scher Einrichtung 301382 km. Die Verschiedenheit dieser Messungen liess dann wieder Zweifel auftauchen, ob nicht die Lichtgeschwindigkeit noch von der Natur des ausgesandten Lichtes abhängig und mit dieser veränderlich sei. J. J. Müller [9]) ver-

---

[1]) Compt. rend. XXX, p. 489, 1850.

[2]) Ibid., p. 551; Pogg. Ann. LXXXI, S. 434.

[3]) Compt. rend. XXX, p. 562 und 771; Pogg. Ann. LXXXI, S. 442 und LXXXII, S. 124.

[4]) Compt. rend. XXIX, p. 90, 1849; Pogg. Ann. LXXIX, S. 167.

[5]) Compt. rend. LV, p. 501 u. 792, 1862; Pogg. Ann. CXVIII, S. 485 u. 588.

[6]) Compt. rend. LXXVI, p. 338, 1873, und LXXX, p. 1361.

[7]) Nature XVIII, p. 195.

[8]) Ibid. XXIV, p. 303, 1881.

[9]) Pogg. Ann. CXLV, S. 86, 1872. J. J. Müller, 1846—1875, Professor am Polytechnicum in Zürich.

mutbete 1872 eine Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Lichtes von der Intensität desselben; Forbes und Young wollten eine Differenz zwischen den Geschwindigkeiten des verschiedenfarbigen Lichtes bemerkt haben; doch verhält man sich im Allgemeinen ablehnend gegen diese Annahmen. Die grösseren Abweichungen aber, welche die aus älteren astronomischen Messungen erhaltenen Resultate von den obigen Werthen zeigten, führte man auf eine etwas zu gross angenommene Entfernung der Sonne von der Erde zurück.

Optik. c. 1840 bis c. 1860.

Noch eine andere für die Undulationstheorie sehr interessante Erscheinung brachten um diese Zeit Fizeau und Foucault [1]) zur Sprache. Zwei Lichtstrahlen können nur interferiren, wenn sie in entgegengesetzter Phase, aber in sonst vollkommen gleichen Schwingungszuständen sich befinden; es können darum nur Theile eines ursprünglich geeinten Lichtstrahls interferiren, die auf irgend eine Art einen gewissen Phasenunterschied erhalten haben. Nun fragt es sich, ob dieser Phasenunterschied der interferirenden Strahlen nur eine halbe Schwingung oder ob er auch ein Vielfaches von Schwingungen plus einer halben Schwingung betragen darf. Die beiden Physiker bestätigten durch Versuche an dicken Platten das letztere und konnten noch Strahlen zur Interferenz bringen, die einen Gangunterschied von 7394 Schwingungen zeigten. Sie bemerken dazu am Schluss ihrer Abhandlung: „L'existence de ces phénomènes d'influence mutuelle entre deux rayons, dans le cas de grande différence de marche, est intéressante pour la théorie de la lumière, en ce qu'elle révèle dans l'émission des ondes successives une régularité persistante qu'aucun phénomène n'indiquait jusqu'ici“ [2]).

Mit den Erscheinungen der Reflexion und Refraction des Lichtes stehen die der Absorption in einem nothwendigen Zusammenhange, sogar insofern, als sie wie jene von dem Polarisationszustande des betreffenden Lichtes sich abhängig zeigen. Biot [3]) hatte schon bemerkt, dass von Turmalinkrystallen nur der ausserordentliche Strahl durchgelassen, der ordentliche aber bei gehöriger Dicke der Krystallblättchen ganz absorbirt wird. Aehnliche Erscheinungen einer auswählenden Absorption hatte man dann noch an anderen Krystallen beobachtet, aber doch die Sache nicht tiefer untersucht. Haidinger constatirte nun [4]), dass, wie die Brechung, auch die Absorption des Lichtes von der Art der optischen Elasticität des Mediums, durch welches das Licht hindurchgeht, abhängig ist, dass sie nur in isotropen Medien nach allen Richtungen hin in gleicher Weise er-

---

[1]) Ann. de chim. et de phys. (3) XXX, p. 146, 1850; Pogg. Ann., Ergänzungsbd. II, S. 355.

[2]) Ann. de chim. et de phys. (3) XXX, p. 159, 1850.

[3]) Siehe S. 156 d. Bandes.

[4]) Pogg. Ann. LXV, S. 1, 1845 u. f. W. Haidinger (5. Februar 1795 Wien — 19. März 1871 Wien), Director der geologischen Reichsanstalt in Wien.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

folgt, während sie bei einachsigen Krystallen in der Richtung der Achse ganz anders als in den Richtungen senkrecht zur Achse und bei zweiachsigen Krystallen endlich nach allen Richtungen verschiedener Elasticität auch in verschiedener Weise geschieht. Dazu bemerkte er noch, dass diese auswählende Absorption nicht bloss die Intensität des Lichtes im Allgemeinen, sondern auch die verschiedenen Farben desselben in verschiedener Weise verändern kann. Haidinger beobachtete diese Erscheinungen, die er bei einachsigen Krystallen mit dem Namen Dichroismus, bei zweiachsigen mit dem Namen Pleochroismus bezeichnete, an vielen krystallisirten Stoffen; allgemeine Gesetze für diese Art der Absorption vermochte er jedoch nicht zu entdecken.

Die Erscheinungen der Absorption des Lichtes in durchsichtigen Medien liessen darauf schliessen, dass die Bewegungen des undulirenden Lichtäthers zum Theil wenigstens von den Molecülen der Körper aufgenommen und in andere Kraftformen, meist wohl in Wärme, umgesetzt werden könnten. Zu gleicher Zeit traten aber auch Vorgänge in den Vordergrund, die darauf hinwiesen, dass die von der ponderablen Materie absorbirten Schwingungen in manchen Fällen wieder an den Aether abgegeben werden und in mehr oder weniger veränderter Weise als Licht wieder erscheinen. Diese Vorgänge, welche direct auf den zur harmonischen Resonanz analogen Begriff der optischen Resonanz hindrängten, waren besonders die Phosphorescenz und die Fluorescenz des Lichtes.

Das Interesse der Physiker an der Phosphorescenz hatte sich früher darauf beschränkt, Stoffe aufzusuchen und zusammenzusetzen, die nach vorgängiger Belichtung besonders stark und besonders lange nachleuchteten. Die Emanationstheorie hatte bei ihrer Annahme eines specifischen Lichtstoffes diese Erscheinungen auch leicht aus einer stärkeren Anhäufung des Lichtstoffes in den betreffenden Körpern und einer folgenden nur allmäligen Abgabe dieses angesammelten Lichtstoffes erklären können. Die Undulationstheorie dagegen hatte zuerst kein rechtes Erklärungsprincip für die Phosphorescenz anzugeben vermocht und darum war auch die Beschäftigung mit diesen Erscheinungen vor der Hand mehr in den Hintergrund getreten. Erst als man sich gewöhnte, die Wellenbewegungen des Aethers allseitiger mit den Bewegungen anderer elastischer Mittel, wie der Luft, zu vergleichen, als nach und nach die Idee eines Abklingens auch beim Licht auftauchte, begannen wieder die Untersuchungen über phosphorescirende Körper sich zu mehren. P. Riess[1]) bestätigte 1845 durch Versuche an Diamanten die schon seit Wilson bekannte Thatsache, dass die stärker brechbaren Lichtstrahlen vor Allem die Phosphorescenz hervorrufen, die rothen

---

[1]) Pogg. Ann. LXIV, S. 334, 1845.

dieselbe aber schwächen. Draper[1]) abstrahirte 1851 aus Beobachtungen der durch elektrisches Licht hervorgerufenen Phosphorescenz des Flussspaths die etwas ungleichwerthigen Gesetze: 1) der phosphorescirende Körper erleidet während des Leuchtens keine merkliche Volumenveränderung; 2) eine Structurveränderung scheint durch die Phosphorescenz nicht bedingt zu werden; dagegen scheint 3) durch Phosphorescenz die Oberfläche des leuchtenden Körpers eine Modification zu erleiden (Quecksilberdämpfe wurden an den leuchtenden und nicht leuchtenden Stellen verschieden condensirt); 4) ein phosphorescirender Körper strahlt unzweifelhaft mit dem Licht auch Wärme aus; 5) ein durch Insolation phosphorescirender Körper zeigt keine Elektricität; 6) die absolute, durch Phosphorescenz ausgestrahlte Lichtmenge ist äusserst gering; 7) die Phosphorescenz steht im Zusammenhange mit der Temperatur des Körpers, so dass ein Körper um so stärker phosphorescirt, je kälter er bei der Bestrahlung ist. Am intensivsten aber und wohl auch am erfolgreichsten beschäftigte sich Edmond Becquerel[2]) mit dem Problem der Phosphorescenz. Die betreffenden Abhandlungen erschienen seit 1839 in den Comptes rendus der Pariser Akademie, sowie auch in den Annales de chimie et de physique, zuletzt gesammelt in der selbständigen Schrift La lumière, ses causes et ses effets, 2 Bde. (Paris 1867/1868); doch enthält auch schon die Abhandlung Recherches sur les divers effets lumineux qui résultent de l'action de la lumière sur les corps vom Jahre 1859 (Ann. de chim. (3) LV, p. 5—119) die wichtigsten Resultate sowie auch die Beschreibung des Phosphoroskops. Dieses letztere bestand aus zwei mit einer Achse drehbaren Scheiben, welche jede mit einer Oeffnung versehen war, von denen die eine zum Einfallen des Lichtes, die andere zum Beobachten diente. Diese Oeffnungen standen einander nicht direct gegenüber, sondern waren vielmehr so angebracht, dass zuerst die Lichtöffnung und dann die Oeffnung für den Beobachter an einem bestimmten Orte vorüberging. Zum Ausschluss alles fremden Lichtes waren die Scheiben in eine fest stehende Trommel eingeschlossen, in deren ebene Wände zwei den Oeffnungen der Scheiben entsprechende, aber einander direct gegenüberstehende Oeffnungen eingeschnitten waren. Innerhalb des Zwischenraums der Scheiben in der Richtung der Verbindungslinie der beiden Trommelöffnungen befand sich der auf seine Phosphorescenz zu untersuchende Körper. Durch Kurbel und Zahnräder liessen sich die Scheiben so schnell drehen, dass man die Körper schon $^1/_{2000}$ Secunde nach der

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

[1]) Phil. Mag. (4) I, p. 81, 1851. J. Will. Draper (5. Mai 1811 Liverpool — 4. Januar 1882 Hastings bei New-York), zuletzt Professor der Chemie und Physiologie in New-York, Verfasser der „Geschichte der geistigen Entwickelung Europas.“

[2]) Alexandre Edmond Becquerel, geb. am 24. März 1820 in Paris, Sohn von Antoine César B., Prof. d. Physik am Conservatoire des arts et métiers in Paris.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

Insolation beobachten konnte. Becquerel unterscheidet folgende Arten der Phosphorescenz: 1) Phosphorescenz durch blosse Erhöhung der Temperatur oft noch unter Rothglühhitze (Diamant, Flussspath); 2) Phosphorescenz durch mechanische Effecte, Krystallisation oder Spaltung; 3) Phosphorescenz durch Elektricität (Leuchten der mit verdünnten Gasen gefüllten Röhren beim Durchgange des elektrischen Stromes); 4) freiwillige Phosphorescenz (Thiere, Pflanzen); 5) Phosphorescenz durch Insolation. Für die letztere (die gewöhnlichste) stellte er dann die speciellen Sätze auf: 1) die violetten und ultravioletten Strahlen des Spectrums sind die wirksamsten; 2) die Theile des Spectrums, welche Phosphorescenz hervorrufen, sind verschieden gross und liegen verschieden für die verschiedenen Substanzen; 3) die Farbe des ausgestrahlten Phosphorescenzlichtes ist für jede Substanz eigenthümlich und steht in keiner Beziehung zur Farbe des hervorrufenden Lichtes; 4) ein Theil des Spectrums (der weniger brechbare) hebt die Phosphorescenz auf, die durch Bestrahlung des violetten Lichtes empfangen worden ist; 5) bringt man den phosphorescirenden Körper ins Dunkle, so wird die Phosphorescenz immer schwächer und erlischt, dann aber bringt eine Temperaturerhöhung sie wieder zum Vorschein; 6) Erhöhung der Temperatur während der Insolation vermindert die nachher auftretende Phosphorescenz; 7) lässt man das Spectrum, welches unter gewöhnlichen Umständen die Fraunhofer'schen Linien von $A$ bis $H$ zeigt, auf Papier fallen, das mit Schwefelcalcium bedeckt ist, so verlängert sich dasselbe bedeutend, und man kann Linien von $A$ bis $P$ unterscheiden [1]). Becquerel fand vermittelst seines Phosphoroskops eine Menge neuer Phosphore und constatirte vor Allem, dass alle fluorescirenden Stoffe eine wenn auch schwache Phosphorescenz zeigen. Er war danach geneigt, die Fluorescenz überhaupt nur für eine simultane Phosphorescenz und beide Probleme für identisch zu erklären. Dieser Ansicht hat man sich dann allgemein angeschlossen.

Die Fortdauer der Wirkungen bei der Phosphorescenz gegenüber dem plötzlichen Erlöschen derselben bei der Fluorescenz hat A. H. Emsmann zu erklären versucht [2]). Nach ihm zeigen die Körper zu den Lichtschwingungen ein ähnlich verschiedenes Verhältniss wie Eisen und Stahl zu den magnetischen Wirkungen. Der durch die Bestrahlung der Körper eingeleiteten Bewegung der Atome gegenüber sollen dieselben mit einer

---

[1]) Der letzte Satz findet sich schon in der Abhandlung der Ann. de chim. et de phys. (3) IX, p. 120, wie auch in der Bibliothèque universelle vom August 1842. Ueber die erste Beobachtung der Verlängerung des Spectrums ist mannigfach gestritten worden; jedenfalls hat J. Herschel ebenfalls noch im Jahre 1842 beim Auffallen des Spectrums auf Papier, das mit Curcumatinctur getränkt war, diese Verlängerung beobachtet. (Phil. Trans. 1842, p. 181: On the action of the rays of the solar spectrum on vegetable colours; die Beobachtung an Curcumatinctur s. S. 194.)

[2]) Pogg. Ann. CXIV, S. 654, 1861.

gewissen Coërcitivkraft ausgestattet sein, welche die jedesmalige Anordnung der Atome zu erhalten strebt, und diese Coërcitivkraft soll bei den phosphorescirenden Körpern verhältnissmässig stark, bei den fluorescirenden aber verhältnissmässig schwach sein. Doch erscheint das Wort Coërcitivkraft hier vorläufig begrifflich so leer, dass eine weitere Aufklärung der unbekannten Ursache durch dasselbe jedenfalls nicht constatirt werden kann.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

Die Fluorescenz hat ihre gar merkwürdigen und in vieler Hinsicht lehrreichen Schicksale gehabt. Die erste Beobachtung einer Fluorescenzerscheinung beschrieb, wie wir schon im zweiten Theile dieses Werkes (S. 122) erwähnt, Nicolò Monardes im 16. Jahrhundert; Kircher beschäftigte sich dann eingehend mit dieser Erscheinung im vierten Capitel seiner Ars magna lucis et umbrae, und Boyle endlich beschrieb in seiner Art die Erscheinungen genauer. Die mehr mathematische Behandlungsweise, welche seit Newton in der Optik herrschend wurde, liess diese Beobachtungen ferner ganz übersehen und in Vergessenheit gerathen. Erst Goethe, der die Allgemeinheit seiner Geistesinteressen auch speciell in seiner Farbenlehre zeigte, erwähnte wieder die Kircher'schen Beobachtungen [1]). Da aber das nephritische Holz (es stammt nach Goethe von Guilandina Linaei) damals schon nicht mehr officinell und in den Apotheken selten geworden war, so theilte er in den „Nachträgen zur Farbenlehre" in dem Capitel „Trübe Infusionen" [2]) nach der Vorschrift des Chemikers Döbereiner die Bereitung eines wässerigen Auszuges aus Lignum quassiae (von Quassia excelsa) mit, der ähnliche optische Eigenschaften wie der Auszug aus nephritischem Holz zeigte. Er selbst fügte dann noch eine neue Beobachtung zu: „Man nehme einen Streifen frischer Rinde von der Rosskastanie, stecke denselben in ein Glas Wasser, und in der kürzesten Zeit wird man das vollkommenste Himmelblau entstehen sehen, da wo das von fern erleuchtete Glas auf dunklen Grund gestellt ist, hingegen das schönste Gelb, wenn wir es gegen das Licht halten." Bei der Gegnerschaft der Physiker gegen des grossen Dichters Farbenlehre aber wurden diese werthvollen Beobachtungen übersehen. Auch die weiteren Fluorescenzerscheinungen, welche Brewster im Jahre 1833 [3]) am Chlorophyll und im Jahre 1838 [4]) am Flussspath bemerkte, wurden weder von ihm selbst noch von Anderen in ihrer allgemeinen Bedeutung gewürdigt. Erst John Herschel behandelte im Jahre 1845 diese Phänomene mit richtiger Werthschätzung und mit der Ahnung, dass man hier eine ganze Classe neuer optischer Erscheinungen vor sich habe.

---

[1]) Sämmtl. Werke in 36 Bänden b. Cotta u. Kröner, 34. Bd., S. 58, und 35. Bd., S. 101.

[2]) Sämmtliche Werke in 36 Bänden bei Cotta und Kröner, Bd. 35, S. 297.

[3]) Edinburgh Transactions XII, p. 542, 1834 (gelesen 1833).

[4]) Rep. on the VIII. meeting of the brit. Assoc. for the adv. of science, Trans. of the sections, p. 10.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

In zwei Abhandlungen der Philosophical Transactions [1]) beschrieb er an mehreren Substanzen, vor Allem an schwefelsaurem Chinin, eine, wie er meinte, nur an der Oberfläche der Körper stattfindende Dispersion, nach der diese Substanzen im reflectirten Licht anders gefärbt erschienen, als im durchgegangenen. Er bemerkte diese anomale Dispersion am grünen Flussspath von Alston-Moor, der an der Oberfläche ein zartes Blau zeigte, an einer sauren (nicht alkalischen) Lösung von schwefelsaurem Chinin, an Esculin und Calophen, nicht aber an Cinchonin und Salicin. Herschel glaubte, dass bei dieser Art der Oberflächenreflexion das Licht je nach dem reflectirenden Stoffe in bestimmter Weise modificirt werde, er nannte das auf solche Weise reflectirte Licht epipolized und die ganze Erscheinung epipolic dispersion. Brewster griff danach seine früheren Untersuchungen über dieses Thema mit erneutem Eifer auf, kam auch dabei im Allgemeinen zu denselben Erfahrungen wie Herschel, konnte aber mit dessen Erklärung in keiner Weise übereinstimmen. Er leitete [2]) die merkwürdigen Erscheinungen nicht von einer oberflächlichen, sondern im Gegentheil von einer Dispersion im Innern der betreffenden Körper ab, hervorgerufen „durch eine Anzahl doppeltbrechender Krystalle, die ihre Achsen doppelter Strahlenbrechung in allen möglichen Richtungen hin zu liegen haben, und deshalb von ihren hinteren Oberflächen ein Lichtbündel mit allseitiger Polarisation reflectiren“. „Die unzählbaren reflectirenden Oberflächen, welche das eingedrungene Licht unter allen möglichen Winkeln auffangen, reflectiren es in allen möglichen Richtungen, so dass das Auge, wo es sich auch befinden möge, das Bündel gleichsam selbstleuchtend sieht.“ Einige Unterschiede, die sich bei seinen und Herschel's Beobachtungen ergaben, vor Allem das Fehlen jeder Polarisation des reflectirten Lichtes bei Herschel, führte Brewster auf den Umstand zurück, dass Herschel gewöhnliches Tageslicht, er aber ein schmales Bündel von einer Linse concentrirten, starken Lichtes zur Beobachtung benutzt habe. Das Opalisiren gewisser Körper unterscheidet er von den hierher gehörigen Erscheinungen und führt jenes auf Sprünge und Canäle im Innern der opalisirenden Körper als Ursache zurück.

Ein noch bedeutenderes Aussehen aber nahmen diese Erscheinungen nach den Untersuchungen von Stokes [3]) an, durch welche vollständig neue

---

[1]) Ἀμόρφωτα, No. 1: on a case of superficial colour presented by a homogeneous liquid internally colourless. Ἀμόρφωτα, No. 2: on the epipolic dispersion of light. Phil. Trans. 1845, p. 143. Einzelne Beobachtungen wie auch Spuren seiner Theorie rühren übrigens aus älterer Zeit her; schon in seinem Treatise on light von 1828 sagt er: „Ein merkwürdiges Beispiel von solcher oberflächlichen Farbe, die von der durchgelassenen verschieden ist, trifft man beim grünen Flussspath von Alston-Moor an“. (Art. 1076.)

[2]) On the decomposition and dispersion of light within solid and fluid bodies, Edinb. Trans. 1846, p. 111; Pogg. Ann. LXXIII, S. 531.

[3]) George Gabriel Stokes, geb. am 13. August 1819 zu Skreen in Irland, Professor der Physik in Cambridge, Präsident der Royal Society.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

Aufschlüsse über das Wesen des Lichtes selbst gegeben werden sollten. Stokes stellte seine Beobachtungen in folgender Weise an: Von einem senkrechten Spalt im Fensterladen fiel Sonnenlicht auf drei hinter einander aufgestellte Münchener Prismen. Dadurch entstand im dunklen Zimmer einige Fuss vom Spalt ein mässig reines Spectrum. Ein Reagenzglas mit der Lösung des zu untersuchenden Stoffes wurde dann von dem ultrarothen Ende an durch das Spectrum hindurchgeführt. Bis zum Violett ging das Licht ohne Weiteres durch die Flüssigkeit, aber vom äussersten Violett an begann die Flüssigkeit selbst mit geisterhaft blauem Licht zu leuchten [1]), welches mit dem Fortschreiten im Spectrum zuerst noch an Intensität zunahm, aber dann allmälig verschwand. Diese Erscheinung, wie die auch schon von Becquerel und Herschel beobachtete Verlängerung des Spectrums auf phosphorescirenden Substanzen, charakterisirte Stokes mit den begeisterten Worten, dass die innere Dispersion die Physiker mit Augen zum Sehen der unsichtbaren Strahlen versehe. Lichtstrahlen übrigens, so beobachtete Stokes, welche einmal durch fluorescirende Substanzen hindurch gegangen und Fluorescenz erregt hatten, waren nicht im Stande, noch einmal in der gleichen Substanz hinter der ersten Fluorescenzerscheinungen hervorzurufen. Die innere Dispersion begann auch für die verschiedenen Medien, die Stokes untersuchte, nicht immer an denselben, sondern an verschiedenen Stellen des Spectrums; die Brechbarkeit des einfallenden Lichtes aber war nie kleiner, als die des Fluorescenzlichtes; homogenes, wirksames Licht konnte zusammengesetztes erzeugen. Die Untersuchungen des Spectrums von elektrischem Licht mit fluorescirenden Substanzen liessen erkennen, dass dieses Licht Strahlen von noch grösserer Brechbarkeit als die Sonnenstrahlen enthält, dass aber alle stärker brechbaren Strahlen von Glas fast ganz absorbirt werden, während dieselben durch Quarz frei hindurchgehen [2]). Stokes liess sich darum Prismen und Linsen aus Bergkrystall machen und untersuchte später mit diesen die Spectren des Funkens einer Leydener Flasche oder des Volta'schen Lichtbogens. Wenn er dann die so erzeugten Spectren auf Uranglas oder besser auf Papier, welches mit Uransalzen präparirt war, auffing, so übertrafen dieselben das Spectrum des sichtbaren Lichtes sechs- bis siebenmal an Länge [3]).

Im Anfange seiner Arbeiten gebrauchte Stokes für diese Erschei-

---

[1]) „Gewiss war es ein sonderbarer Anblick, die Röhre beim Eintauchen in die unsichtbaren Strahlen augenblicklich erleuchtet zu sehen; es war buchstäblich sichtbare Dunkelheit. Kurz, die Erscheinung hatte etwas Ueberirdisches." (Pogg. Ann., Ergänzungsbd. IV, S. 186.)

[2]) On the change of refrangibility of light, Mem. I, Phil. Trans. 1852, p. 463; Pogg. Ann., Ergänzungsbd. IV, S. 177; Mem. II, Phil. Trans. 1853, p. 385; Pogg. Ann. XCVI, S. 522.

[3]) Phil. Trans. 1862, p. 599; Pogg. Ann. CXXIII, S. 30.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

nungen noch den Brewster'schen Namen der inneren Dispersion, später aber bezeichnete er sie, um auch der Herschel'schen Anschauung gerecht zu werden, als „dispersive Reflexion". Doch war ihm auch dieser Ausdruck noch nicht neutral genug. „Ich bekenne, sagt er, dieser Ausdruck gefällt mir nicht. Am liebsten möchte ich ein Wort prägen, die Erscheinungen Fluorescenz nennen, von Flussspath, ähnlich wie Opalescenz von Opal hergeleitet ist" [1]). Das Wort fand Anklang, und in seiner zweiten Abhandlung ging Stokes zur definitiven Annahme desselben über. „In meinem früheren Aufsatze, so sagt er dort, schlug ich das Wort Fluorescenz vor, um die allgemeine Erscheinung bei einer Lösung von schwefelsaurem Chinin und ähnlichen Medien zu bezeichnen. Ich wurde ermuthigt, die Bedeutung dieses Ausdruckes zu erweitern, und beabsichtige von nun an statt wahrer innerer Dispersion [2]) die Benennung Fluorescenz zu gebrauchen, da es ein einziges, keine Theorie einschliessendes Wort ist" [3]). Das Letztere war für Stokes die Hauptsache, denn Stokes vermochte sich weder Herschel noch Brewster in ihren theoretischen Ansichten anzuschliessen. Nach ihm ist die Ursache der Erscheinungen überhaupt nicht in einer Reflexion oder Dispersion, weder in einer inneren noch in einer oberflächlichen, sondern in dem unsichtbaren, ultravioletten Licht zu suchen, das in den fluorescirenden Körpern in weniger brechbares, sichtbares Licht umgewandelt wird. Treffen nämlich die Wellen des Lichtäthers auf ponderable Massen, so werden durch die Aetherwellen auch die Molecüle dieser Massen in Schwingungen versetzt werden, wenn sie ihrer Grösse und Lage nach nur geeigneter Geschwindigkeiten fähig sind. Da aber die Bewegungen hier von feineren auf gröbere Massen übertragen werden, so ist anzunehmen, dass bei dieser Uebertragung die Geschwindigkeit der Schwingungen und damit die Schwingungsanzahl in einer bestimmten Zeit verkleinert wird. Da nun die Bewegungen der ponderablen Molecüle ohne weitere Veränderungen wieder auf den Aether übergehen können, so hat die geschilderte Absorption und Emission des Lichtes durch die ponderablen Massen nur den Erfolg, dass alle absorbirten Lichtwellen in ihrer Schwingungsgeschwindigkeit verkleinert und in ihrer Wellenlänge vergrössert werden. Die in einem Lichtbündel enthaltenen ultravioletten Strahlen können also durch geeignete Körper in weniger brechbares, violettes und blaues Licht umgewandelt werden, und dieses von den Körpern ausgestrahlte, sichtbare Licht ist das Fluorescenzlicht. Schon in seiner ersten Abhandlung bekennt sich Stokes zu der Ueberzeugung, dass man nach der Undulationstheorie die Fluorescenz nur in einer Veränderung der Brechbarkeit

---

[1]) Pogg. Ann., Ergänzungsbd. IV, S. 205.

[2]) Stokes hatte eine falsche (die von Staubtheilen in der Flüssigkeit herrührt) und eine wahre (die Fluorescenz) innere Dispersion unterschieden.

[3]) Pogg. Ann. XCVI, S. 526.

der Strahlen suchen darf, und allgemein spricht er da auch schon aus: „Es giebt bei der inneren Dispersion ein Gesetz, welches allgemein zu sein scheint, nämlich, dass, wenn die Brechbarkeit des Lichtes durch die Dispersion geändert wird, sie immer erniedrigt wird. Ich habe sehr viele Medien ausser den erwähnten untersucht und nirgends auch nur eine Ausnahme getroffen“ [1]).

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

Indessen hat es gerade diesem Gesetze in seiner Allgemeinheit nicht an Angriffen gefehlt, wenn man auch sonst der Theorie von Stokes die Anerkennung nicht versagte. Emsmann stellte im Jahre 1859 [2]) dieser Stokes'schen Fluorescenz, welche er als positive bezeichnete, eine negative gegenüber, bei welcher die Brechbarkeit der Strahlen durch den fluorescirenden Körper erhöht werden sollte, und 1866 [3]) meinte er, eine solche negative Fluorescenz durch Versuche wirklich nachgewiesen zu haben. Auch Akin [4]) und Tyndall [5]) glaubten Erscheinungen beobachtet zu haben, die man als negative Fluorescenz bezeichnen könnte. Diese Beobachtungen betrafen das Glühend- und dadurch Leuchtendwerden von Körpern im Brennpunkte von Hohlspiegeln, auf welche nur dunkle Wärmestrahlen fielen. Der Erstere nannte diese Umwandlung von Wärmestrahlen in Lichtstrahlen Calcescenz, der zweite Calorescenz. C. Bohn [6]) aber wies schon die Annahme dieser Erscheinungen als Beispiele negativer Fluorescenz als ungerechtfertigt zurück, weil diese Vorgänge doch nicht eine unmittelbare Verwandlung von Lichtstrahlen niederer in solche von höherer Brechbarkeit darstellen, sondern die Aussendung der Lichtstrahlen höherer Brechbarkeit erst in Folge von Temperaturerhöhungen als Wirkung dieser und nicht als directe Wirkung der Wärmestrahlen auftritt. Schwerer war den Beobachtungen zu begegnen, die Lommel gegen das Gesetz von Stokes ins Gefecht führte. Lommel [7]) zeigte im Jahre 1871, dass Magdalaroth im Lichte einer Natronflamme, die doch nur gelbes, fast homogenes Licht aussendet, ein Fluorescenzspectrum giebt, das, vom Gelben ins Grüne hinüberziehend, noch über die $D$-Linie hinausreicht, und glaubte hierin die gesuchte directe Umwandlung des Lichtes von niederer in höhere Brechbarkeit sicher gefunden zu haben. Zwar kamen Hagenbach [8]) und mit

[1]) Pogg. Ann., Ergänzungsbd. IV, S. 238.
[2]) Marbach's physik. Lexikon, 2. Aufl., VI, S. 1081.
[3]) Pogg. Ann. CXXIX, S. 352, 1866.
[4]) Phil. Mag. (4) XXVIII, p. 554 ff., 1864.
[5]) Ibid., p. 329 ff., 1864.
[6]) Pogg. Ann. CXXX, S. 367, und CXXXIII, S. 165, 1867 und 1868.
[7]) Pogg. Ann. CXLIII, S. 26, 1871. — Eugen Lommel, geb. am 19. März 1837 in Edenkoben in der Pfalz, 1868 Prof. der Physik in Erlangen, 1886 in München.
[8]) Pogg. Ann. CXLVI, S. 65 u. f., 1872, Jubelbd., S. 303, 1874. — Eduard Hagenbach, geb. am 20. Februar 1833, Professor der Physik in Basel.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

ihm einige Andere bald zu der Ansicht, dass auch hier eine solche Umwandlung nicht anzunehmen und das Hinüberreichen des Fluorescenzspectrums über die Natronlinie viel mehr durch eine Unreinheit, eine nicht vollständige Homogenität des einfallenden Lichtes zu erklären sei; Lommel aber ist bis jetzt bei seiner Ansicht geblieben und hat immer neue Belege für dieselbe beizubringen versucht [1]).

Diejenigen Physiker, welche das Stokes'sche Gesetz über die Umwandlung des Lichtes bei der Fluorescenz nicht annahmen, mussten natürlich auch eine andere Art der Erklärung dieser Umwandlung geben, und in der That sind noch mehrere solcher Erklärungen versucht worden. W. Eisenlohr [2]) meinte, dass, wie aus zwei Tönen Combinationstöne entstehen, aus zwei verschiedenfarbigen Lichtstrahlen auch Combinationsfarben hervorgehen könnten, die nach dem Beispiele der Combinationstöne an Schwingungszahl geringer als die combinirenden Farben sein müssten. Das Fluorescenzlicht könnte dann durch eine Combination der ultravioletten und der blauvioletten Strahlen hervorgebracht werden. Lommel [3]) verwarf zwar schon im Jahre 1862 diese Erklärung, weil auch homogenes Licht Fluorescenz erregen kann, hielt sie aber für verbesserungsfähig. Nach ihm ist das Fluorescenzlicht allerdings auch ein Combinationslicht, doch nicht aus den verschiedenen Farben eines Lichtstrahls, sondern vielmehr entstanden durch die Combination des einfallenden mit dem von dem Körper durch optische Resonanz wieder ausgesendeten Lichte. Bohn [4]) machte dann darauf aufmerksam, dass danach auch die negative Fluorescenz in voller Strenge als möglich, ja sogar nothwendig erscheine, weil man eine Combination der Farben nicht bloss nach Analogie der Differenz-, sondern auch der Helmholtz'schen Summationstöne annehmen müsse. Später entwickelte Lommel [5]) selbst seine Theorie entsprechend seinen neuen Erfahrungen weiter. Er nahm nun

---

[1]) Nachdem Lommel noch einige andere Ausnahmen von dem Stokes'schen Gesetze gefunden, sagt er 1876 (Pogg. Ann. CLIX, S. 514) über die zwei Arten von Fluorescenz, die er auch schon 1871 unterschieden hatte: „Bei der ersten Art ruft jeder erregungsfähige homogene Lichtstrahl, der vermöge seiner Brechbarkeit innerhalb der Grenzen des Fluorescenzspectrums oder eines bestimmten Gebietes desselben fällt, nicht bloss Strahlen von grösserer und gleich grosser, sondern auch von kürzerer Wellenlänge hervor, und zwar letztere so weit sie dem betreffenden Gebiet angehören. Bei der zweiten Art ruft jeder erregungsfähige, homogene Lichtstrahl nur diejenigen Strahlen des Fluorescenzspectrums hervor, welche eine grössere oder mindestens gleich grosse Wellenlänge besitzen als er selbst.“ (S. 535.) Die meisten fluorescirenden Körper zeigen nur Fluorescenz der zweiten Art; Fluorescenzspectren der ersten Art geben Magdalaroth, Chlorophyll und Eosin; einige Stoffe besitzen beide Arten von Fluorescenz.

[2]) Pogg. Ann. XCIII, S. 623, 1854.

[3]) Ibid. CXVII, S. 642, 1862.

[4]) Ibid. CXXX, S. 391, 1867.

[5]) Ibid. CXLIII, S. 26, 1871.

an, dass die auffallenden Lichtstrahlen nicht nur die Körpermolecüle, welche mit ihnen im Einklange sind, in Bewegung zu setzen oder auch schon vorhandene Schwingungen zu stärken vermögen, sondern dass dies auch bei den in der tieferen oder auch der höheren Octave schwingenden ponderablen Molecülen der Fall sein könne. Die so erregten Fluorescenzfarben, welche an Schwingungszahl dem einfallenden Lichte im Allgemeinen gleich sind, geben die Fluorescenz erster Art. Meist aber combiniren sich diese ursprünglichen Töne mit den miterzeugten tieferen Octaven zu Differenztönen, deren Schwingungszahlen kleiner sind als die des einfallenden Lichtes, diese Combinationstöne geben die Fluorescenz zweiter Art. Lommel hält auch die Entstehung von Summationsfarben für möglich, meint jedoch, dass diese ihrer geringen Intensität wegen unmerklich sein müssten [1]. Zwischen den beiden entgegenstehenden Hypothesen ist es zu einer endgültigen Entscheidung noch nicht gekommen. Für die Stokes'sche wie für die Eisenlohr-Lommel'sche Theorie bildete die Wechselwirkung zwischen den Bewegungen des Aethers und denen der ponderablen Molecüle ein solches Moment der Unsicherheit, dass keine derselben ein absolutes Uebergewicht über die andere erlangen konnte. Trotzdem lässt sich nicht verkennen, dass auch auf diesem schwierigen Gebiete doch die Undulationstheorie sich bedeutend fruchtbar erwies, dass die Schlüsse von den Eigenschaften bekannterer Wellenbewegungen, wie des Schalles, auf die des Lichtes sich vielfach anregend zeigten, und wohl zu beachten ist, wie sich schon seit dem Anfange der vierziger Jahre der Begriff der optischen Resonanz immer mehr ausbildete und immer mehr geltend machte.

Eine eigenthümliche und sehr überraschende Anwendung der Methode, von akustischen Verhältnissen auf optische zu schliessen, machte auch Ch. Doppler im Jahre 1842 [2]. Er erinnerte nämlich daran, dass die Empfindung einer Wellenbewegung nicht bloss von deren Wellenlänge abhängen könne, sondern auch von den Bewegungen des empfindenden Organes und der Quelle der Wellenbewegung selbst beeinflusst werden müsse; so beim Schalle, wie auch beim Lichte. Er gebrauchte diese Bemerkung vor Allem zur Erklärung des farbigen Lichtes der Sterne. Bei einer Annäherung des leuchtenden Körpers muss uns gelbes Licht in Grün, Blau und Violett, bei einer Entfernung desselben aber in Orange und Roth übergehen. Danach werden

---

[1]) In einer Abhandlung vom Jahre 1878 (Wiedem. Ann. III, S. 251) bemüht sich Lommel, seine Theorie der Fluorescenz mathematisch tiefer zu begründen. Zur Erklärung der Absorption des Lichtes nimmt er da eine der Reibung ganz analoge Wechselwirkung zwischen den Molecülen des Aethers und denen der ponderablen Materie zu Hülfe.

[2]) Ueber das farbige Licht der Doppelsterne, Prag 1842. — Christian Doppler (29. November 1803 Salzburg — 17. März 1853 Venedig), Professor der Mathematik in Prag, dann in Schemnitz, zuletzt in Wien.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

alle Sterne, die sich uns nähern oder sich von uns entfernen, also jedenfalls alle Doppelsterne, obwohl sie an sich wahrscheinlich alle weiss sind, farbiges Licht zeigen, wie das auch wirklich beobachtet worden ist. Buys-Ballot[1]) prüfte Doppler's Theorie in akustischer Beziehung auf drei Stationen der Eisenbahn zwischen Utrecht und Maarsen. An den Stationen wurde ein bestimmter Ton von einem Blasinstrumente angegeben, auf einer fahrenden Locomotive standen Musiker, welche den Ton nach seiner Höhe aufzeichneten, oder auch umgekehrt. In Bezug auf die Veränderung der Tonhöhe mit der Bewegung der Tonquelle oder des Hörenden fand Buys-Ballot Doppler's Theorie vollkommen bestätigt. Bei der grossen Geschwindigkeit des Lichtes aber hielt er die Geschwindigkeit der Sterne wie auch die der Erde für zu gering, um das weisse Sternenlicht in farbiges umändern zu können. Dazu kam, dass auch die Beobachtung an Doppel- und veränderlichen Sternen ihm nicht für diese Theorie zu sprechen, und dass ihm die Annahme, dass alles Sternenlicht ursprünglich weiss sei, ganz willkürlich begründet schien. Doppler versuchte seine Meinung gegen Buys-Ballot in mehreren Abhandlungen[2]) zu vertheidigen, doch schlossen sich die Physiker damals fast ausnahmslos an den Letzteren an, und erst später, nach Entdeckung der Spectralanalyse, fand man in dieser auch das Mittel, die durch Annäherung oder Entfernung der Lichtquelle verursachte Verschiebung der Farben zu erkennen[3]).

Merkwürdigerweise blieb diese immer häufigere Benutzung akustischer Analogien in der Optik fast ganz ohne Einfluss auf die Anschauungen von dem Zusammenhange der dunklen und der hellen Spectrallinien. Bei Brewster zwar, der wieder im Jahre 1850 eine grössere Abhandlung[4]) über die Spectrallinien veröffentlichte,

---

[1]) Pogg. Ann. LXVI, S. 321, 1845. Auch Scott Russel bestätigte durch Versuche auf Locomotiven, die sich mit der bedeutenden Geschwindigkeit von 50 bis 80 englischen Meilen in der Stunde bewegten, die Doppler'sche Theorie.

[2]) Pogg. Ann. LXVIII, S. 1; LXXXI, S. 270; LXXXV, S. 371.

[3]) Nur B. Bolzano (Prof. d. Religionsphilosophie in Prag) betonte, dass Doppler's Schrift mehr leiste, als der Titel verspreche, und für die Akustik und Optik, wie für die ganze Wellenlehre gleich wichtig sei. Zwar glaubt er nicht an Doppler's Rechnungsresultat, dass schon eine Sternbewegung von 33 Meilen in der Secunde (nach oder von uns) sich durch eine Farbenveränderung bemerkbar machen müsste; aber er schliesst doch seinen Aufsatz mit den Worten: „Ich erwarte mit aller Zuversicht, dass man sich ihrer (der Doppler'schen Theorie) Sätze dereinst bedienen wird, um eben aus den Veränderungen, welche die Farbe des Lichtes der Himmelskörper mit der Zeit erfährt, die Fragen, ob und in welchen Richtungen und mit welchen Geschwindigkeiten sie sich bewegen, welche Entfernungen sie von uns und unter einander haben, und noch vieles Andere zu entscheiden." (Pogg. Ann. LX, S. 83, die letzten Sätze S. 88.) Und Sestini (Astronom am Collegio Romano) macht für Doppler's Theorie geltend, dass in der Zone des Himmelsgewölbes, wohin sich unser Planetensystem bewegt, vor Allem blaue, in der entgegengesetzten Zone vor Allem rothe und in der mittleren Zone vor Allem weisse Fixsterne vorkommen. (Pogg. Ann. LXXXI, S. 274.)

[4]) Compt. rend. XXX, p. 578; Pogg. Ann. LXXXI, S. 471. Brewster,

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

war das in Anbetracht seiner Gegnerschaft gegen die Undulationstheorie begreiflich, aber auch andere Physiker kamen in der Betrachtung dieser Erscheinungen nicht recht weiter. W. A. Miller hatte 1845 [1]) die Wirkung farbiger Gase und Dämpfe auf das von ihnen durchgelassene Licht, sowie viele durch Metallsalze gefärbte Flammen untersucht, er hatte auch die Absorptionsspectren wie die Spectren der Salze von sehr verschiedenem, charakteristischem Aussehen gefunden, einen Zusammenhang aber zwischen diesen Spectren und eine Abhängigkeit derselben von der chemischen Zusammensetzung der betreffenden Substanzen hatte er nicht constatirt und dem Tone seiner Abhandlung nach auch gar nicht gesucht. „Meine Beobachtungen, sagte er, betreffen hauptsächlich zwei Gegenstände: die Wirkung farbiger Gase und Dämpfe auf das von ihnen durchgelassene Licht, und die von verschiedenen Flammen erzeugten Spectra. Ehe ich die Anstellungsweise der Versuche auseinandersetze, will ich kurz die Hauptergebnisse in Betreff des ersten Gegenstandes angeben: 1) Bei Anwendung farbloser Gase habe ich niemals neu hinzutretende Linien entdecken können . . .; 2) Farben allein bedingen noch nicht das Vorkommen von Linien . . .; 3) aus der Farbe eines Gases kann auch noch nicht auf die Lage der Linien geschlossen werden . . .; 4) sowohl einfache als zusammengesetzte Körper geben Linien, und zwei einfache Körper, die sie einzeln nicht hervorbringen, können sie in ihrer Verbindung reichlich erzeugen . . .; 5) es können auch in Dämpfen einfacher Substanzen, wie in Joddampf, Linien vorkommen, während in ihren Verbindungen keine enthalten sind . . .; 6) zuweilen erscheinen dieselben Linien in den verschiedenen Oxydationsstufen einer und derselben Substanz . . .; 7) die Linien wachsen in Zahl und Dichtheit bei Verlängerung der vom Lichte durchlaufenen farbigen Schicht, oder bei Erhöhung ihrer Farbenintensität durch irgend eine Ursache . . .; 8) die Linien erscheinen sowohl im polarisirten als im unpolarisirten Lichte. Obwohl ich noch keinen Versuch darüber angestellt, so leidet es doch wenig Zweifel, dass diese Linien (die Absorptionslinien) so gut wie die Fraunhofer'schen eine Abwesenheit vom chemischen Einfluss wie vom Licht bezeichnen" [2]). Im zweiten Theile seiner Arbeit, der von den Spectren farbiger Flammen handelt, giebt Miller nur Beschrei-

---

der bei mehreren hellen Linien (Salpeter, Strontiumnitrat) das Zusammenfallen mit Fraunhofer'schen Linien bemerkt, schliesst danach weiter: „Je n'ai aucun doute que, dans la combustion de différents sels ou métaux de semblables lignes brillantes ne doivent s'observer coincident avec d'autres des principales raies du spectre ordinaire." (S. 581.) Eine Erklärung dieser Erscheinung versucht er nicht.

[1]) Phil. Mag. (3) XXVII, p. 81, 1845; Pogg. Ann. LXIX, S. 404, 1846. William Allen Miller (17. December 1817 Ipswich, Suffolk — 30. September 1870 Liverpool), Prof. d. Chemie in London.

[2]) Pogg. Ann. LXIX, S. 405—407.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

bungen der Spectren von Kupferchlorid, Borsäure, salpetersaurem Strontian, Chlornatrium etc. und kommt dabei zu dem Schluss [1]: „In Bezug auf die Speculationen über die absorbirende Wirkung der Atmosphäre der Sonne kann die Bemerkung von Interesse sein, dass, wenn Sonnenlicht durch eine Flamme geleitet wird, welche ausgebildete, schwarze Linien zeigt [2]), diese Linien auch in dem zusammengesetzten Spectrum zum Vorschein kommen, sobald nur nicht das Sonnenlicht zu intensiv gegen das der farbigen Flamme ist. Es scheint daher leuchtende Atmosphären zu geben, in welchen nicht nur gewisse Strahlen fehlen, sondern welche auch eine positive Absorptionswirkung auf andere Lichter ausüben" [3]).

Zehn Jahre später beschäftigte sich W. Swan in einer Abhandlung [4]) „über die prismatischen Spectren der Flammen von Kohlenwasserstoffverbindungen" eingehender mit dem Zusammenfallen der hellen und dunklen Linien, kam aber dabei eher zu negativen als positiven Resultaten. Er sagt darüber am Schlusse seiner Abhandlung: „Die erste dieser Coincidenzen (der Natron- und der $D$-Linien) ist längst bekannt, schon von Fraunhofer entdeckt; und ähnliche merkwürdige Relationen giebt es, wie seitdem Sir Dav. Brewster entdeckte, zwischen gewissen Linien des durch „flammenden Salpeter" hervorgebrachten Spectrums und den entsprechenden Linien des Sonnenspectrums. Aus diesen sonderbaren, in so vielen Fällen vorkommenden Coincidenzen könnte man die Folgerung ziehen, dass alle helle Linien der Flammenspectra zusammenfallen mit dunklen Linien des Sonnenspectrums ... Man wird indess sehen, dass die beobachteten Ablenkungen der Linien $b_2$ und $\gamma_2$ um nicht weniger als 40″ verschieden sind, was ganz jenseits der Summen der wahrscheinlichen Fehlergrenzen bei der Beobachtung dieser Linien liegt ... Die Coincidenz derselben beweist sich hiernach als sehr unwahrscheinlich" ... „Aus den

---

[1]) Pogg. Ann. LXIX, S. 416.

[2]) Das bezieht sich vorzüglich auf das Spectrum des Strontiumnitrats, dessen röthlicher und orangefarbiger, besonders entwickelter Theil von drei starken schwarzen Linien durchsetzt erscheint. Miller schreibt also hier fälschlicherweise der Flamme nicht bloss die hellen Linien, sondern auch die dunklen Stellen im Spectrum als Wirkungen zu.

[3]) Miller giebt in dieser Abhandlung zum ersten Male Abbildungen der Spectren farbiger Flammen, und zwar von Kupferchlorid, Borsäure, Strontiumnitrat, Chlornatrium und Chlorbaryum; dieselben sind unseren jetzigen gegenüber kaum zu erkennen. Die betreffenden Salze wurden meist in dem Alkohol der gebrauchten Spirituslampe gelöst, einige Mal aber auch im Knallgasgebläse verdampft. Den sogenannten Bunsen'schen Brenner, der jetzt in der Spectralanalyse eine so grosse Rolle spielt, beschrieben Bunsen und Roscoe erst im Jahre 1857 bei Gelegenheit einer Arbeit über photochemische Messungen. (Pogg. Ann. C, S. 84—86.)

[4]) Edinburgh Trans. XXI, p. 411; Pogg. Ann. C, S. 306.

gleichzeitigen Beobachtungen der Spectren des Sonnenlichtes und des ölbildenden Gases, sowie aus den Resultaten der Theodolit-Beobachtungen glaube ich, dass auch die übrigen hellen Linien des Kohlenwasserstoffspectrums nicht coincidiren mit dunklen Linien, sondern mit hellen Räumen des Sonnenspectrums" [1]). Günstiger waren die Resultate Swan's in Bezug auf die Abhängigkeit der hellen Linien von den Elementen, deren Verbindungen in den gefärbten Flammen glühen. Er constatirte nicht bloss, dass die hellen Linien fast aller Kohlenwasserstoffe identisch sind, sondern dass auch die helle *D*-Linie, welche in allen Spectren auftritt, immer vom Natrium herrührt, dem Element, welches überall in Spuren wenigstens sich verbreitet zeigt und von dem schon $^2/_{100\,000}$ Gran genügen, um die *D*-Linie in der Flamme erkennen zu lassen.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

Neben den Beobachtungen der Flammenspectren gingen Untersuchungen des Spectrums des elektrischen Funkens, vor Allem des Davy'schen Lichtbogens, einher. Wheatstone hatte 1835 [2]) gefunden, dass die Spectren der elektrischen Funken, die zwischen metallischen Polen überspringen, dem Sonnenspectrum ähnlich sind und wie dieses aus sieben Gruppen gefärbter, durch dunkle Zwischenräume getrennter Linien bestehen, doch waren bei Anwendung verschiedener Metalle diese Linien in ihrer Färbung und Stellung wie auch in ihrer Anzahl so verschieden, dass man die angewandten Metalle leicht aus dem Spectrum erkennen konnte. Foucault bemerkte 1849 [3]) die stete Uebereinstimmung zweier hellen Stellen im Spectrum des Davy'schen Lichtbogens mit der dunklen Doppellinie *D* im Sonnenspectrum. Despretz schloss 1850 [4]) aus seinen Versuchen, dass die hellen Linien im Spectrum des elektrischen Funkens von der Stromstärke unabhängig seien. Ångström zeigte im Jahre 1855 [5]), dass chemische Verbindungen der Metalle bei diesen Erscheinungen dieselben Linien geben wie die einzelnen Metalle selbst, nur wollte er bemerken, dass einzelne Linien bei einigen Verbindungen ausblieben oder sich mit grossen Schwierigkeiten zeigten und dass bei einer Legirung von Zinn und Zink die Linien vom Blau nach dem Violetten hin etwas verschoben wären [6]). Plücker aber

---

[1]) Pogg. Ann. C, S. 329—330.
[2]) Ibid. XXXVI, S. 148.
[3]) L'Institut 1849, p. 45.
[4]) Compt. rend. XXXI, p. 419.
[5]) Pogg. Ann. XCIV, S. 141.

[6]) Dass Ångström von der richtigen Erkenntniss der Constanz der Spectrallinien noch ziemlich entfernt war, ersieht man auch aus den folgenden Worten: „Ein directer Versuch zeigte indess, dass *D* im elektrischen Spectrum (Spectren elektrischer Funken bei verschiedenen Elektroden in verschiedenen Gasen) nicht vollkommen zusammenfällt mit der brandgelben Linie, welche sich im Spectrum der Alkoholflamme oder der äusseren Lichtflamme bildet, sondern

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

schloss 1858 [1]) aus dem Spectrum des elektrischen Funkens in Geissler'schen Röhren ganz sicher auf die Gase, mit denen die Röhre gefüllt war. Das Spectrum des Ammoniaks ist nach ihm gebildet durch Uebereinanderlagerung der Spectren von Wasserstoff und Stickstoff; das Spectrum des Sauerstoffs zeigt zwei schmale, glänzende Streifen an der Grenze des Spectrums und im Orange [2]).

Merkwürdigerweise kam man nun, obgleich die Constanz der Spectrallinien noch keineswegs festgestellt, doch der Erklärung der dunklen Fraunhofer'schen Linien und damit dem Schlüssel zu dem Geheimniss der Spectralanalyse, wie es scheint, ganz ungesucht von anderer Seite näher. Ångström stellte im Jahre 1855 in der eben erwähnten Arbeit den Satz auf, dass ein Körper „im glühenden Zustande gerade alle die Lichtarten aussenden muss, welche er in gewöhnlicher Temperatur absorbirt"; ein Satz, der jedenfalls der Verbesserung und Klarstellung bedurfte. Vollkommen bestimmt dagegen gab Balfour Stewart fünf Jahre [3]) später das durch Kirchhoff bald nachher so berühmt gewordene Gesetz über das Verhältniss der Absorption und Emission: „The absorption of a plate equals its radiation and that for every description of heat" [4]). Doch

---

dem Rothen etwas näher liegt. Die brandgelbe Linie fällt nämlich zusammen mit der allen Metallen gemeinsamen, links von $D$ liegenden Linie, welche ich mit $n$ bezeichnet habe." (Pogg. Ann. XCIV, S. 148.) „Allen Metallen gemeinschaftlich ist die Linie $n$; auch die Linie $m$ im Rothen, obwohl sie wegen ihrer Schwäche schwer ihrer Lage nach mit Genauigkeit zu bestimmen ist, scheint allen gemeinsam zu sein." (Ibid., S. 150.) Ångström hat sich später (ibid. CXVII, S. 293, 1862) darüber beklagt, dass die Entdecker der Spectralanalyse seine Verdienste nicht genug hervorgehoben, wir denken mit Unrecht.

[1]) Pogg. Ann. CV, S. 67. Plücker sagt da: „Ich habe, wie ich glaube, zuerst mit Bestimmtheit ausgesprochen, dass die Lichterscheinungen, welche die elektrische Entladung durch längere, Gas entleerte Röhren begleiten, abgesehen von den besonderen Erscheinungen in der Nähe der beiden Elektroden, einzig und allein durch die in den Röhren zurückgebliebenen Gasspuren bedingt werden."

[2]) Pogg. Ann. CV, S. 78. Julius Plücker (16. Juli 1801 Elberfeld — 22. Mai 1868 Bonn), bis 1833 ausserordentlicher Professor in Bonn, dann Lehrer am Friedrich-Wilhelms-Gymnasium in Berlin, 1834 Professor der Mathematik in Halle und 1836 Professor der Mathematik in Bonn. Zuerst fast nur auf rein geometrischem Gebiete, neue Bahnen brechend, aber ohne augenblickliche Anerkennung thätig, wandte er sich seit dem Ende der vierziger Jahre ausschliesslich physikalischen Untersuchungen zu, auch hier mit Vorliebe neue Wege aufsuchend.

[3]) Edinb. Trans. XXII, p. 1 und 59, 1861. Die Abhandlung ist datirt vom Jahre 1858 und führt den Titel: An account of some Experiments on Radiant Heat involving an extension of Prévost's theory of Exchanges. — Balfour Stewart (1. November 1828 Edinburgh — 21. December 1887 Manchester) war seit 1870 Professor der Physik am Owen's College in Manchester.

[4]) Ibid., p. 13.

zeigt selbst die Fassung dieses Satzes, dass derselbe vorerst für Wärme gedacht war und dass er somit eines Zusammenhanges mit der Spectralanalyse im Geiste des Urhebers noch ermangelte. Eins lässt sich bei Uebersicht aller dieser Arbeiten jedenfalls nicht verkennen, dass es nämlich an Beobachtungen des Spectrums durchaus nicht fehlte, dass auch die Methode der Beobachtung keine falsche, dass aber trotz der Vollständigkeit des Materials der Gedanke der Spectralanalyse in den bisher geschilderten Arbeiten gewiss noch nicht explicite enthalten war. Bis jetzt hatte man an der rein empirischen Seite des Problems, an der blossen Beobachtung der Erscheinungen festgehalten, das Problem der Spectralanalyse war aber nicht durch blosse Beobachtung, sondern nur durch theoretische Zusammenfassung und Vergleichung des Beobachteten zu lösen. Wer in der Wissenschaft eine blosse Beschreibung der Erscheinungen schon für genügend oder auch nur für möglich hält, der kann hier an einem Beispiele sehen, wie weit man mit einer solchen Beschreibung allein, ohne die Erkenntniss oder auch nur die Voraussetzung eines ursächlichen Zusammenhanges der Dinge gelangen könnte.

Die bisher erwähnten rein optischen Arbeiten beschäftigten sich mit dem Problem der Absorption des Lichtes durch ponderable Massen nur insoweit, als das absorbirte Licht doch als Licht, wenn auch verändert, wieder zum Vorschein kam. In der Zeit der Aufstellung des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft aber musste man das Problem noch allgemeiner fassen und auch die Transformationen des Lichtes behandeln, die nicht wieder auf Lichterscheinungen selbst zurückführten. Diese Untersuchungen hatten ihre besonderen Schwierigkeiten, weil man die Wirksamkeit der Lichtstrahlen von der der Wärmestrahlen schwer oder gar nicht zu trennen vermochte. Am ehesten schien noch die Transformation der Lichtbewegung in chemische Kräfte discutirbar, da hier die Wirkungen am mächtigsten [1]) und die Wärme- und Lichtstrahlen auch von entgegengesetzten Eigenschaften sich zeigten. Die ältesten Beobachter der chemischen Wirkung des Lichtes hatten zu finden geglaubt, dass nur die brechbarsten Strahlen fähig seien, die beobachteten chemischen Wirkungen auszuüben, und dass die rothen und gelben Strahlen in ihrer Wirkung die der ersteren nur aufheben könnten. Ed. Becquerel freilich glaubte schliessen zu dürfen, dass zwar nur die brechbarsten Strahlen fähig seien, die chemische Wirkung zu beginnen, dass aber alle Lichtstrahlen die einmal begonnene Wirkung fortzuführen vermöchten [2]). Moser hielt sogar alle Lichtstrahlen derselben chemischen Wirkungen für fähig und meinte nur, eine quantitative

[1]) Die Entdeckung der Photographie hat wohl den grössten Theil zur eifrigen Aufnahme dieser Untersuchungen beigetragen.

[2]) Pogg. Ann. LXXVII, S. 82.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

Verschiedenheit derselben zugeben zu können. Die neueren Arbeiter auf diesem Gebiete jedoch, Fizeau, Foucault, Draper u. A., schlossen sich wieder der Meinung der älteren Physiker an. Draper machte zur Erklärung der abweichenden Ansichten darauf aufmerksam, dass in dem durch Brechung des Lichtes erzeugten Spectrum das violette Ende viel stärker aus einander gezogen und gewissermaassen mehr verdünnt werde als das rothe, und dass diese Verdünnung eine genaue Bestimmung der verhältnissmässigen Wirksamkeit der einzelnen Theile der Spectra überhaupt hindere; er empfahl darum für solche Bestimmungen die Beugungsspectren. Die ausgedehntesten Versuchsreihen über die Intensität und die Gesetze der chemischen Wirkung der Lichtstrahlen veröffentlichten danach in den Jahren von 1855 an R. Bunsen und H. E. Roscoe, welche, nachdem Versuche mit Chlorwasser ungünstige Resultate ergeben hatten [1]), in einer elektrolytisch aus Salzsäure entwickelten Mischung von Chlor und Wasserstoff die für solche Zwecke geeignetste Substanz fanden [2]). In wie weit aber die beobachteten chemischen Wirkungen nur der Transformation des Lichtes entstammen, oder in wie weit die Lichtstrahlen bloss auf die in den Materien enthaltenen chemischen Spannkräfte auslösend wirken und wie weit dabei die auslösende Kraft der ausgelösten Wirkung proportional gesetzt werden darf, diese Fragen sind bei den photochemischen Untersuchungen bisher noch kaum gestellt worden.

Schliesslich müssen wir noch die Entwickelung der Optik nach einer ganz anderen Seite hin, die in dieser Periode besonders mächtig wurde, wenigstens andeuten. Bis in das jetzige Jahrhundert hatte die mathematische Optik ein entschiedenes Uebergewicht in dieser Disciplin behauptet. Unter dem Einflusse dieser Richtung hatte man das Charakteristische der Lichterscheinungen vor Allem in dem geradlinigen Gange der Lichtstrahlen gefunden und alle optischen Vorgänge in der Körperwelt auf Veränderungen dieses geradlinigen Ganges zurückzuführen gesucht. Die Newton'sche Dispersionstheorie war ein gutes Zeichen für die Fruchtbarkeit dieser Idee. Unter dem Einflusse der Undulationstheorie und der neueren Anschauungen in der Physik begann man aber den Ursachen jener Richtungsveränderungen in den Körpern und den Wechselwirkungen zwischen den Wellenbewegungen des Aethers und denen der ponderablen Massen überhaupt mehr und mehr nachzuforschen und dadurch bildete sich dann eine speciell physikalische Optik aus, von der wir einzelne Theile eben behandelt haben. Doch zeigte sich auch diese noch nicht zur Erklärung aller unserer Lichtempfindungen geeignet.

---

[1]) Pogg. Ann. XCVI, S. 373.

[2]) Ibid. C, S. 43 und 481 u. s. f. Nach Bunsen und Roscoe hat Draper (Phil. Mag. (3) XXIII, p. 401, 1843) zuerst und bis dahin allein die Mischung von Wasserstoff und Chlor zu photochemischen Messungen verwandt.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

Man sah sich vielmehr genöthigt, nun besonders auch auf das empfindende Organ und seine Einflüsse die Aufmerksamkeit zu richten, und kam so noch zu einer physiologischen Optik [1]). Die ersten Arbeiten auf diesem Gebiete begannen mit einer Revision der schon so vielfach angegriffenen, rein mathematischen Theorie der Farben. Dass dabei ein im Allgemeinen allerdings nicht eingestandener Einfluss der Goethe'schen Farbenlehre thätig war, lässt sich nach dem Auftreten der einzelnen Themata kaum verkennen. Auch zeugt dafür die Thatsache, dass der auf diesem Gebiete erfolgreichste Arbeiter, H. Helmholtz [2]), die Reihe seiner Untersuchungen mit einer populärwissenschaftlichen Vorlesung „über Goethe's naturwissenschaftliche Arbeiten" [3]) begann, in denen er eingehend und liebevoll mit des grossen Dichters Schmerzenskinde sich beschäftigte. Leider können wir die vielen interessanten Arbeiten auf diesem Gebiete nur ganz kurz andeuten. Plateau [4]), Fechner [5]), Brücke [6]) u. A. untersuchten mit ungeheurem Fleiss und auf Kosten ihrer Gesundheit [7]) die Farben, welche Goethe als physiologische bezeichnet hatte und die nun subjective genannt werden. Als Ursachen derselben erkannte man, erstens die längere Fortdauer der Empfindung auch nach dem Aufhören des äusseren Reizes, die aber für die verschiedenen Farben verschieden ist, und zweitens die Eigenthümlichkeit des Auges, bei längerer Einwirkung einer Farbenempfindung für diese Farbe nach und nach unempfindlich zu werden und dann aus einem neuen äusseren Farbenreize nur die Complementär-

---

[1]) Die Theilung des Gebietes ist nicht ohne merkliche Schwierigkeiten geblieben, vor Allem darum, weil schliesslich noch als neuer Mitbewerber die Philosophie auftrat und auch noch eine philosophische oder psychologische Optik forderte. Die Ansprüche der Philosophie stützten sich dabei auf Kant, der den Raum für eine reine Anschauung erklärte und in aller Erkenntniss neben den Daten der Empfindung auch reine Verstandesfunctionen als ordnende und Einheit gebende Elemente nachwies. Der Physiolog aber, im Gefühl seiner sicheren Erfolge, war nicht gewillt, sich enge Grenzen setzen zu lassen. Wir können auf diese Discussionen, die, wie so viele Differenzen zwischen der Philosophie und der Naturwissenschaft, ein nahes Ende nicht voraussetzen lassen, hier nicht eingehen.

[2]) Das umfassende Werk „Physiologische Optik" von Helmholtz erschien von 1856 an als ein Band der Allg. Encyklopädie der Physik von G. Karsten.

[3]) Gehalten 1853 in der Deutschen Gesellschaft in Königsberg, abgedruckt in „Vorträge und Reden", Braunschweig 1884, S. 1.

[4]) In Poggendorff's Annalen von Bd. XXXII bis Bd. LXXX in vielen Artikeln.

[5]) Pogg. Ann. XLIV, S. 221; XLV, S. 227; L, S. 193 und 427.

[6]) Ibid. LXXXIV, S. 418, 1851.

[7]) Plateau und Fechner erblindeten, Letzterer wenigstens zeitweilig, in Folge dieser Untersuchungen. Brücke schliesst seine Abhandlung mit den Worten: „Wenn ich hiermit diese Untersuchungen abschliesse, so geschieht es... lediglich deshalb, weil die Folgen der andauernden Anstrengung meiner Augen mir verboten haben, sie weiter fortzusetzen." (Pogg. Ann. LXXXIV, S. 447.)

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

farbe der ersteren aufzunehmen. Die Dauer des Lichteindruckes hatte Plateau im Jahre 1830[1]) gemessen und dieselbe nicht bloss, wie die Theorie erforderte, nach der Intensität, sondern auch für die verschiedenen Farben des Lichtes verschieden gefunden. Emsmann gelangte im Jahre 1854[2]) zu etwas abweichenden Werthen, stimmte aber principiell ganz mit Plateau überein.

Schwerer als auf diesem Gebiete war eine Einigung über das Wesen der Irradiation zu erzielen. Baden Powell wandte sich 1849[3]) gegen Plateau's Lehre von dem Ausbreiten des Lichtreizes auf der Netzhaut über die Umrisse der Bilder hinaus und erklärte die Irradiation nicht für eine subjective, sondern für eine objective Erscheinung, hervorgerufen durch eine Diffraction des Lichtes, die theils durch das Auge, theils durch die optischen Apparate, wie Fernrohre etc., hervorgebracht wird. Er, wie auch H. Welcker[4]), machten gegen das Subjective der Irradiation geltend, dass man dieselbe auch am künstlichen Auge wahrnehmen und überall durch Linsen aufheben könne.

H. Meyer[5]) erklärte danach die sphärische Aberration für die Ursache der Irradiation; Andere hielten dieselbe für die Folge einer unvollkommenen Accommodation des Auges. Helmholtz zeigte, dass beide Ursachen, die erstere weniger, die letztere mehr, die Zerstreuungskreise um die Bilder hervorbringen können, welche die Erscheinung der Irradiation verursachen. Da aber nach Volkmann auch bei vollkommener Accommodation des Auges die Irradiation sich zeigte, so musste noch ein drittes Moment für dieselbe entdeckt werden. Als ein solches gab Helmholtz[6]) die nie vollständige Achromasie des Auges an, die schon von Fraunhofer[7]) bemerkt und festgestellt worden war. Die meisten Physiologen und Physiker schlossen sich dann auch diesen Ansichten an, und die Plateau'sche Annahme eines Uebergreifens der Empfindung auf der Netzhaut erwies sich als überflüssig, wenn auch deren Möglichkeit nicht geleugnet wurde.

Nicht geringere Schwierigkeiten als die Erklärung der Irradiation bot die Erforschung der Vorgänge bei der Accommodation des Auges. Brücke gab 1845[8]) vier Ursachen für dieselbe als möglich an: 1) die Verlängerung des Krümmungsradius der Cornea; 2) die Veränderung der Convexität der Linsenflächen; 3) die Bewegung der Linse nach vorn und 4) die Verlängerung des Augapfels nach der Längenachse. Er neigte zur Annahme des letzten Punktes als des wahrscheinlich rich-

[1]) Pogg. Ann. XX, S. 304.

[2]) Ibid. XCI, S. 611.

[3]) Rep. of the Brit. Ass. 1849, Communications to the Sections, p. 9. — Baden Powell, 1796—1860, Geistlicher, Prof. d. Geometrie in Oxford.

[4]) Ueber Irradiation, Giessen 1852.

[5]) Pogg. Ann. LXXXIX, S. 540, 1853.

[6]) Physiologische Optik, Leipzig 1867, S. 321.

[7]) Gilbert's Ann. LVI, S. 304, 1817.

[8]) Fortschritte der Physik I, S. 199.

tigsten. Langenbeck und Helmholtz [1]) aber constatirten bald darauf, dass die zweite der angegebenen Ursachen die eigentlich wirkende sei. Die merkwürdige Erscheinung des verschiedenen Glanzes der Körper erklärte Dove im Jahre 1851 [2]) aus der Verschiedenheit der Bilder nach Helligkeit und Farbe, welche die beiden Augen von den betreffenden Gegenständen erhalten, und bewahrheitete seine Theorie durch Versuche mit dem Stereoskop. Die Unsichtbarkeit der ultravioletten und ultrarothen Strahlen suchte Brücke auf eine von der gewöhnlichen Ansicht abweichende Art zu erklären, nämlich nicht durch eine Unempfindlichkeit der Netzhaut für diese Strahlen, sondern durch eine Absorption derselben in den optischen Medien des Auges vor der Netzhaut [3]). Mit Karsten und Knoblauch wies er diese Absorptionen wenigstens an Ochsenaugen direct durch Versuche nach [4]). Von unschätzbarer Wichtigkeit aber für unsere Kenntniss des Auges und besonders der Netzhaut im gesunden und kranken Zustande und damit von fundamentaler Bedeutung für die Entwickelung der Augenheilkunde war die Erfindung des Augenspiegels durch Helmholtz im Jahre 1851 [5]).

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

Eine merkwürdige Bereicherung, auf die man durch die gewöhnliche Untersuchung des Sonnenspectrums nicht kommen konnte, erfuhr die Farbenscala durch Brücke im Jahre 1848 [6]). Er machte darauf aufmerksam, dass zwei wohl definirte Farben, nämlich das Braun und das von Herschel schon bemerkte Lavendelgrau, im Spectrum des Sonnenlichtes nicht zu finden wären, dass dieselben aber leicht durch Polarisationsapparate dargestellt werden könnten. Er spaltete Gypsblättchen terrassenförmig ab und brachte dieselben unter das Polarisationsmikroskop. Von der dünnsten Stelle an zeigten sich dann bei parallelen Nicols die Blättchen zuerst farblos, dann lavendelgrau, dann violett u. s. w., bei gekreuzten Nicols aber trat Braun an Stelle des Lavendelgrau. Braun ist also weniger brechbar als Roth, und Lavendelgrau ist stärker brechbar als Violett. Listing [7]) constatirte später, dass das Lavendelgrau in derselben Zeit doppelt so

---

[1]) M. Langenbeck, Klinische Beiträge, Göttingen 1849. Helmholtz: über eine bisher unbekannte Veränderung am menschlichen Auge bei veränderter Accommodation, Monatsber. d. Berl. Akad. 1853, S. 137; über die Accommodation des Auges, Gräfe's Archiv f. Ophthalmologie II, S. 1, 1856; auch Wissensch. Abhandlungen II, S. 280 und 283.

[2]) Pogg. Ann. LXXXIII, S. 183.

[3]) Ibid. LXV, S. 593, 1845.

[4]) Ibid. LXIX, S. 549, 1846.

[5]) Beschreibung eines Augenspiegels zur Untersuchung der Netzhaut im lebenden Auge, Berlin 1851; abgedruckt in „Wissenschaftl. Abhandlungen“, II, S. 229.

[6]) Pogg. Ann. LXXIV, S. 461.

[7]) Ibid. CXXXI, S. 564, 1867.

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

viel Schwingungen macht als das Braun, und dass somit die sichtbaren Schwingungen des Lichtes gerade eine volle Octave umfassen.

Auch das bei Goethe eine Hauptrolle spielende Problem der Farben trüber Medien griff Brücke wieder auf[1]), die Goethe'schen Beobachtungen im Allgemeinen bestätigend. Als trübe Medien definirte Brücke Gemenge von zwei oder mehreren Stoffen von verschiedenem Brechungsvermögen, in welchen aber die einzelnen Partikel der in eine andere eingemengten Substanz so klein sind, dass sie nicht als solche, sondern nur dadurch wahrgenommen werden, dass sie die Durchsichtigkeit schwächen. Solche trübe Medien stellte er dadurch her, dass er eine weingeistige Lösung von Mastix in Wasser träufelte. Er constatirte damit, dass trübe Medien bei der Reflexion die weniger brechbaren Strahlen stärker absorbiren, als die mehr brechbaren[2]), und dass beim durchgehenden Lichte das Umgekehrte der Fall ist, dass also, wie Goethe angegeben, trübe Medien vor einem dunklen Hintergrunde blau, vor einem hellen dagegen roth oder gelb erscheinen müssen. Wie zu erwarten, bemerkte man an dem von trüben Medien reflectirten Lichte eigenthümliche Polarisationserscheinungen. Es zeigt sich nämlich dasselbe, wenn man in einer Ebene, die auf dem einfallenden Strahle senkrecht steht, nach demselben hinsieht, vollständig polarisirt, und zwar fällt die Polarisationsebene mit der Reflexionsebene zusammen. Diese Polarisationserscheinungen stimmten in ihrer Art vollständig mit denjenigen überein, die man seit längerer Zeit schon an dem von der Atmosphäre diffus reflectirten Tageslicht beobachtet hatte. Der Erste, welcher auf diese partielle Polarisation des diffusen Tageslichtes aufmerksam geworden, war Arago[3]); Babinet[4]) und besonders Brewster[5]) hatten dieselbe dann weiter verfolgt. Arago wie Brewster führten die Polarisation auf eine directe Reflexion des Lichtes an den Lufttheilchen zurück. Brücke aber hielt dafür, dass diese Reflexion an fremden, in der Luft suspendirten Theilchen geschehe und dass also die blaue Farbe der Atmosphäre ebenso wie die Morgen-

---

[1]) Ueber die Farben, welche trübe Medien im auffallenden und durchfallenden Lichte zeigen, Sitzungsber. der Wiener Akademie IX, S. 530; Pogg. Ann. LXXXVIII, S. 363, 1853. — Ernst Wilhelm Brücke, geboren am 6. Juni 1819 in Berlin, seit 1849 Professor der Physiologie in Wien.

[2]) Nach der Fresnel'schen Reflexionsformel für durchsichtige Körper wächst die Stärke der Reflexion mit dem Brechungsexponenten. Wenn nun auch bei einmaliger Reflexion das hierdurch hervorgerufene Ueberwiegen des stärker brechbaren Lichtes ein sehr geringes ist, so wächst dieses Ueberwiegen doch sehr bedeutend bei so vielmaliger Reflexion, wie sie in trüben Medien stattfindet.

[3]) Pogg. Ann. XXXII, S. 126, 1834.

[4]) Compt. rend. XI, p. 618, 1840; Pogg. Ann. LI, S. 562.

[5]) Pogg. Ann. LXVI, S. 456, und LXVII, S. 592, 1845 und 1846.

und Abendröthe zu den Farben der trüben Medien zu rechnen seien[1]). Kurz vor Brücke hatte Clausius eine ganz andere Erklärung der blauen Färbung der Atmosphäre gegeben[2]). Auch nach ihm ist das Licht der Atmosphäre ohne Zweifel reflectirtes, aber als Ursache der Reflexion nahm er nur feine Dampfbläschen an, „weil nur diese das Licht der Atmosphäre unverändert durchlassen können". Sind die Häutchen der Bläschen sehr dünn, so müssen sie durch Interferenz die blaue Farbe zeigen. Werden dieselben dicker, so werden sich auch immer neue, dünne Bläschen bilden, das weisse Licht der ersteren wird nur das blaue der letzteren verwaschen. Im durchgelassenen Licht müssen die dünnen Bläschen die Complementärfarben von Blau annehmen, sie müssen also, wenigstens wenn das Licht eine genügend dicke Schicht derselben durchläuft, roth erscheinen. Bei hohem Stande wird danach das Licht der Sonne weiss, am Horizont aber roth oder gelb erscheinen. Diese Erklärung fand viele Gegner. Ausser der Aehnlichkeit der erwähnten Erscheinungen mit den an trüben Medien beobachteten, war vor Allem die Annahme der Dampfbläschen, die immer mehr verlassen wurde, ungünstig für die Clausius'sche Theorie. Die Entstehung solcher Dampfbläschen schien den neueren Physikern schwerer zu erklären als die Himmelsbläue selbst, und wiederholte sorgsame Untersuchungen der aus der Luft condensirten Niederschläge mit dem Mikroskope hatten auch nie einen Anhalt für die letztere Hypothese ergeben[3]).

[1]) Brücke sagt in der citirten Abhandlung über die Farben der trüben Medien: „Die Anwendung von dem, was hier im Allgemeinen von den trüben Medien gesagt ist, auf die Farbenerscheinungen der Atmosphäre ist so einfach, dass ich kaum nöthig habe, darauf zurückzukommen. Es wird einleuchtend sein, weshalb die Farbe der Morgen- und Abendröthe nicht das Complement der Himmelsbläue ist, sondern viel mehr Roth enthält als dieses . . ., dass wir keine Ursache haben, das Sonnenlicht an sich für gelb zu halten, sondern dass die gelbe Färbung von der Atmosphäre herrührt . . ., dass uns der Mond, hoch am Himmel stehend, weisser erscheint als im Horizont, weil zwischen ihm und uns im ersteren Falle eine dünnere Schicht des trüben Mediums ist als im letzteren." (Pogg. Ann. LXXXVIII, S. 379.)

[2]) Pogg. Ann. LXXVI, S. 161 und 188, 1849.

[3]) Die Arbeit von Clausius fachte den alten Streit über die Existenz der Dampfbläschen aufs Neue an. Raillard meinte 1852 (Cosmos I, p. 610, 1852), dass für dieselben ebenso wenig natürliche Gründe sprächen, als sie zur Erklärung der Naturerscheinungen nöthig seien. Reuben Phillips (Phil. Mag. (4) V, p. 28, 1853) erinnerte daran, dass Flüssigkeitsbläschen sich mit einer Kraft zusammenzuziehen streben, die, bei gleicher Dicke der Wände, dem Durchmesser umgekehrt proportional ist, und behauptete, dass die Dampfbläschen, wenn sie auch einmal existirten, doch die Luft in ihnen so stark comprimiren würden, dass dieselbe durch eine Art Endosmose entweichen müsste. Clausius wandte dagegen ein, dass die Häutchen der Bläschen sehr dünn und damit von geringer Spannung sein und dass sich dieselben ja nach dem Vergehen auch immer wieder bilden könnten. Wenn A. Waller (Phil. Trans. 1847, p. 23) unter dem Mikroskope kein Zerfallen oder Zerplatzen der Bläschen wahrgenommen habe, so könne das auch an der Kleinheit der ent-

Optik, c. 1840 bis c. 1860.

Hagenbach hat dann in neuerer Zeit [1]) die innere Diffusion des Lichtes in der Atmosphäre als eine Reflexion desselben an den ungleich dichten Luftschichten betrachtet, und man neigt zu der Meinung, dass auch diese Reflexion zu der Bildung der atmosphärischen Farben beiträgt. Damit war aber die Discussion über diesen Gegenstand noch immer nicht geschlossen, vielmehr sind bis in die neueste Zeit immer neue Erklärungsgründe aufgetaucht. Nichols erklärt die Himmelsbläue für eine subjective Erscheinung, hervorgerufen durch eine mit der Intensität des Lichtes stärker wachsende Ermüdung der Netzhaut für die brechbareren Farben; v. Lorenz hält sie ebenfalls für ein subjectives Phänomen, aber bewirkt durch ungleichzeitige Wahrnehmung des dunklen Himmelsgrundes und des von den Stäubchen in der Atmosphäre reflectirten weissen Lichtes. Nach Lallemand ist das blaue Himmelslicht wenigstens zum Theil eine von der Atmosphäre durch Absorption ultravioletter Strahlen erzeugte Fluorescenzfarbe, und J. Chappuis behauptet, dass ein Theil des blauen Lichtes auch durch die Anwesenheit von Ozon bedingt wird.

Den Bemühungen um die Erklärung der Himmelsbläue entsprachen die Untersuchungen der Farbe des Wassers. Wie man zuerst der atmosphärischen Luft ein allerdings sehr schwaches Blau als Eigenfarbe zugeschrieben, so erklärte man auch das Wasser für schwach blau gefärbt und leitete daraus das Grün desselben ab. Jetzt nun beobachtete man auch am Wasser ähnliche Erscheinungen einer inneren Diffusion des Lichtes wie in der Atmosphäre und führte dann auch die Farben der Gewässer auf eine solche innere Diffusion zurück. Indessen sind hier die Ansichten noch weniger geeinigt und gefestigt, als selbst in dem vorher erwähnten Falle [2]).

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

Mit der **Theorie der Elektricität** kamen im Laufe der vierziger Jahre dieses Jahrhunderts die Physiker in eine üble Lage. Optik und

---

stehenden Theilchen liegen. Gegen Brücke machte Clausius geltend, dass im Zenith, wo das Himmelsblau am stärksten, doch das einmal reflectirte Blau vorwaltet und dass massive Flüssigkeitskügelchen nicht die Farben dünner Blättchen zeigen könnten, was Brücke als zweites Moment für die Erklärung der Farben der Atmosphäre mit angeführt hatte. (Pogg. Ann. LXXXVIII, S. 543, 1853.) Zuletzt hat H. Kiessling (Gymnasialprofessor in Hamburg) noch einen sehr plausiblen Grund gegen die Bläschentheorie geltend gemacht. Erzeugt man künstliche Nebel in einem Recipienten und leitet Lichtstrahlen so hindurch, dass Beugungsringe entstehen, so müssten diese, wenn die Wassertheilchen Bläschen wären, bei Druckvermehrung sich erweitern und bei Druckverminderung sich zusammenziehen. Die Radien der Ringe bleiben jedoch dabei constant. (Verdet-Exner, Wellentheorie des Lichtes II, S. 407.)

[1]) Pogg. Ann. CXLVIII, S. 77, 1873.

[2]) W. Spring (Bull. Ac. Roy. Belgique XII, p. 814, 1886; Beiblätter zu Wiedemann's Ann. XI, S. 822) bestätigt abermals durch Versuche, dass die Farbe des Wassers blau ist und dass alle anderen Färbungen desselben nur durch suspendirte feste Theilchen verursachte Farben trüber Medien sind.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

Wärmelehre gaben in dieser Zeit ihre specifischen Grundstoffe auf und einigten sich über den einen Aether, die feinste, elastischste, alle anderen Stoffe ohne merkbaren Widerstand durchdringende und nur darum imponderable Materie. Im Gebiete der Elektricität und des Magnetismus aber spielten die besonderen Imponderabilien, die elektrischen, manchmal auch die magnetischen Flüssigkeiten noch eine Rolle, die schwer zu verstehen und schwer zu begrenzen war. Waren wirklich diese Fluida eigenthümliche, vom Licht- und Wärmeäther wohl zu unterscheidende Materien oder sollte man auch die elektrischen und magnetischen Erscheinungen nur als besondere Wirkungsweisen jenes Aethers ansehen? Leider handelte es sich weniger um die blosse Bejahung oder Verneinung dieser Frage, als vielmehr um den thatsächlichen Nachweis, wie man jene Erscheinungen wirklich aus besonderen Bewegungen des Aethers abzuleiten vermöge. Darum bejahten wohl die meisten Physiker jene Frage für sich in der Stille [1]), aber nur wenige versuchten jene Ableitungen öffentlich zu geben.

In der That fielen die wenigen, damals hervortretenden Versuche, die Undulationstheorie direct auf die Theorie der Elektricität zu übertragen, nicht gerade ermuthigend aus [2]), und auch die Bemühungen mancher Physiker, an den elektrischen Erscheinungen sichere Kennzeichen der Wellenbewegungen zu entdecken, hatten nur negative Erfolge. Wie Wartmann im Jahre 1845 [3]) sich vergebens anstrengte, an der Elektricität eine Interferenzfähigkeit, so versuchte De Haldat [4]) im nächsten Jahre vergeblich, an dem Magnetismus eine Reflexion, Brechung oder Beugung nachzuweisen. Auch die Physiker, welche immer den Zusammenhang der Erscheinungen im Auge behielten, liessen darum die Frage nach der Art der Bewegung, die wir Elektricität nennen, vorläufig noch unentschieden und bemühten sich nur, eine Ansicht zu gewinnen, die nicht direct die Annahme be-

---

[1]) Interessant ist in dieser Beziehung eine Aeusserung Fechner's (Pogg. Ann. LXIV, S. 342, 1845): „Es verdient Bemerkung, dass das, was man bisher als die Geschwindigkeit der Elektricität bestimmt hat, nicht die wirkliche Geschwindigkeit ihrer Theilchen, sondern bloss die Geschwindigkeit ihrer Wellenfortpflanzung ist, ein, wie es scheint, bis jetzt wenig beobachteter und doch sehr beachtungswerther Unterschied, auf den meines Wissens zuerst W. Weber aufmerksam gemacht hat."

[2]) Vergl. A. J. Maas, Bull. Ac. Roy. Belg. XIV, 1847; W. A. Norton, Silliman's Journ. IV, p. 1 u. 207, 1847.

[3]) Compt. rend. XX, p. 1803, 1845. — John M'Gregor hat (Die Fortschritte der Physik im Jahre 1847, S. 468) vier Gründe gefunden, die es unwahrscheinlich machen, dass jemals an elektrischen Strömen eine Interferenz entdeckt wird: 1) weil die elektrischen Leiter nicht homogen sind; 2) weil die Ströme nicht gleichzeitig ihre Leiter durchströmen; 3) weil kein elektrischer Strom ganz constant ist und 4) weil wir keinen Sinn haben, die Interferenz elektrischer Erscheinungen unmittelbar wahrzunehmen.

[4]) Compt. rend. XXII, p. 873, 1846.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

sonderer elektrischer Flüssigkeiten in sich schloss. Mit keinem geringeren als Faraday an ihrer Spitze verliessen diese Physiker die nun seit langer Zeit ohne Widerspruch gebliebene dualistische Theorie der Elektricität und griffen zur Annahme nur einer elektrischen Flüssigkeit zurück, die man ja ohne weitere Schwierigkeiten mit dem Aether identificiren konnte. Wie natürlich, fand diese Ansicht vor Allem in England, bei den Landsleuten Faraday's, Anklang [1]). In Deutschland und Frankreich aber machte man gegen dieselbe geltend, dass sie bei dem gegenwärtigen Zustande der Kenntnisse von der Constitution der Materie noch ohne reellen Werth und dass sie vor Allem für die mathematische Behandlung der elektrischen Erscheinungen bedeutend unbequemer und unfruchtbarer sei, als die noch allgemein anerkannte dualistische Theorie. Man begnügte sich damit, die letztere als eine brauchbare Hülfshypothese ohne weiteren Anspruch auf eine objective Geltung zu charakterisiren, und behielt sie im Uebrigen ohne weitere Aenderung bei.

Bessere Erfolge als in der Bestimmung des Wesens der elektrischen Erscheinungen hatte man in der Bestimmung ihrer quantitativen Verhältnisse, und die in dieser Beziehung seit den vierziger Jahren mit ungemeiner Raschheit sich häufenden Erfolge sind es nicht zum wenigsten, welche die staunenswerthe Entwickelung der Elektrotechnik in der neuesten Zeit erst ermöglicht haben. Im Anfange des Zeitraumes zwar, als das Ohm'sche Gesetz mehr und mehr Beachtung fand, versuchte man demselben, vorzüglich von französischer Seite her, die allgemeine strenge Gültigkeit weg zu demonstriren. Marié Davy behauptete im Jahre 1846 [2]): „Man muss sich also hüten, den Ohm'schen Gesetzen eine Allgemeinheit zuzugestehen, welche sie nicht haben. Ich habe vielleicht Grund, an ihrer Richtigkeit selbst für thermoelektrische Ströme zu zweifeln; was die einfachen hydroelektrischen Ketten betrifft, so entfernen sie sich bedeutend davon.“ Dem entsprechend betonte auch C. Despretz im Jahre 1852 [3]), dass das Ohm'sche Gesetz keineswegs der genaue Ausdruck der Thatsachen sei, und Secchi [4]) stimmte ihm insofern bei, als er bei grossen, eingeschalteten Widerständen vor Allem die Resultate der Messungen von dem Ohm'schen Gesetze abweichend

---

[1]) Slogett (Phil. Mag. XXVIII, p. 443, 1846) und Smith (ibid. XXIX, p. 404, 1846) nahmen die Franklin'sche Theorie ganz in der alten Gestalt wieder auf; Stevenson (ibid. XXIX, p. 405, 1846) wollte dieselbe insoweit modificiren, als er nur leitende Körper bei einem Ueberschuss an elektrischer Flüssigkeit als positiv, nicht leitende Körper mit einem solchen aber als negativ ansah.

[2]) Compt. rend. XXIII, p. 602: „Il faut se garder d'accorder aux lois de Ohm une généralité qu'elles n'ont pas. J'ai peut-être lieu de douter de leur exactitude, même pour les piles thermo-électriques. Quant aux piles hydro-électriques simples, elles s'en écartent considérablement.“

[3]) Compt. rend. XXXIV, p. 781; Cosmos I, p. 186.

[4]) Cosmos I, p. 329; Fortschritte der Physik im Jahre 1852, p. 477.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

fand. Moigno jedoch bemerkte bei der Aufnahme jenes Artikels von Despretz in seiner Zeitschrift Cosmos, dass er selbst keineswegs mit der Schule übereinstimme, welche sich ein Geschäft daraus mache, zu zeigen, dass die theoretisch bewiesenen Gesetze nicht genau mit der Praxis übereinstimmen, und die an deren Stelle lieber einen Wulst einzelner Beobachtungen und empirischer Formeln stellen wolle. Schärfer noch aber fügte dann Beetz[1]) einem Berichte über diese Vorgänge die Sätze hinzu: eine solche Erinnerung sei gewiss gerade in einem in Paris erscheinenden Blatte am rechten Orte, da es vor allen anderen Zeitschriften die Comptes rendus der Pariser Akademie seien, welche die Wissenschaft mit solchen resultat- und gesetzlosen Untersuchungen belästigten. Währenddem hatte denn auch R. Kohlrausch in den Jahren 1848[2]) und 1849[3]) mit einem von ihm construirten Elektrometer die elektroskopischen Spannungen an den Polen von geöffneten, galvanischen Ketten gemessen und dabei die Ohm'schen Voraussetzungen über diese Spannungen vollkommen bestätigt, wonach auch an der Geltung des Ohm'schen Gesetzes selbst nicht mehr zu zweifeln war. G. Kirchhoff, der das Gesetz schon 1847 seinen berühmten Arbeiten über Stromverzweigungen unbedenklich zu Grunde gelegt, gab dann 1849[4]) noch eine verbesserte Ableitung desselben, in der er nicht, wie das Ohm gethan, die Spannung in einem Stromelement der elektrischen Massendichtigkeit in demselben proportional setzte, sondern diese Spannung durch das Potential der Elektricität an dem betreffenden Orte bestimmte. Er gesellte sich dadurch zu den Physikern und war einer der Ersten unter ihnen, welche den Begriff des elektrischen Potentials, der den recht problematischen Begriff der elektrischen Massendichtigkeit zu eliminiren erlaubte, in seiner Wichtigkeit erkannten und dem entsprechend gebrauchten. Helmholtz aber erweiterte in einer Arbeit vom Jahre 1851[5]) noch den Geltungsbereich des Ohm'schen Gesetzes. Er zeigte, dass dasselbe nicht bloss für constante Ströme offenbar gültig sei, in welchen die Ausgleichung der Stromstärke auf der ganzen Länge der Leitung erfolgt, sondern dass ein modificirter Ausdruck desselben auch noch auf solche Ströme angewendet werden könne, die durch Stromschwankungen inducirt werden, und dass dieser Ausdruck mit wachsender Dauer sich dem Ohm'schen Gesetze asymptotisch nähere. Schliesslich

---

[1]) Die Fortschritte der Physik, VIII, S. 477.

[2]) Pogg. Ann. LXXV, S. 220.

[3]) Ibid. LXXVIII, S. 1.

[4]) Ibid. LXXVIII, S. 506; Gesammelte Abhandlungen, Leipzig 1882, S. 49.

[5]) Ueber die Dauer und den Verlauf der durch Stromschwankungen inducirten elektrischen Ströme. (Pogg. Ann. LXXXIII, S. 505; Wissenschaftliche Abhandlungen, Leipzig 1882, I, S. 429.)

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

aber bestätigte eine Commission der British Association[1]) im Jahre 1876 noch einmal das nun schon alte, viel geprüfte Gesetz.

Das Problem der Stromverzweigung, das wir oben erwähnt, war für einzelne Fälle, wie wir theilweise bereits angedeutet, schon von Ohm, Pouillet, Wheatstone, Poggendorff und W. Weber[2]) bearbeitet worden. Kirchhoff aber behandelte und löste die Aufgabe erst in solcher Allgemeinheit, dass sich alle folgenden Arbeiten auf die seinigen gründeten. Die beiden Sätze, in welchen die Lösung aller Probleme der Stromverzweigung enthalten ist, gab er noch im Jahre 1845 als 21jähriger Student als Anhang zu einer Arbeit „Ueber den Durchgang eines Stromes durch eine Ebene, insbesondere eine kreisförmige“ [3]). Sie lauten: „Wird ein System von Drähten, die auf eine ganz beliebige Weise mit einander verbunden sind, von galvanischen Strömen durchflossen, so ist: 1) wenn die Drähte 1, 2, .. $\mu$ in einem Punkte zusammenstossen:

$$I_1 + I_2 + \cdots + I_\mu = 0,$$

wo $I_1$, $I_2$, .. die Intensitäten der Ströme bezeichnen, die jene Drähte durchfliessen, alle nach dem Berührungspunkte zu als positiv gerechnet; 2) wenn die Drähte 1, 2, .. $\nu$ eine geschlossene Figur bilden:

$$I_1 . \omega_1 + I_2 \; \omega_2 + \cdots + I_\nu . \omega_\nu$$

gleich der Summe aller elektromotorischen Kräfte, die sich auf dem Wege 1, 2,.. $\nu$ befinden; wo $\omega_1$, $\omega_2$,.. die Widerstände der Drähte, $I_1$, $I_2$, .. die Intensitäten der Ströme bezeichnen, von denen diese durchflossen werden, alle nach einer Richtung als positiv gerechnet“ [4]). Die ausführliche Ableitung der Sätze folgte erst ein paar Jahre später[5]), und die allgemeine Auflösung des Problems der Stromverzweigung sprach Kirchhoff da in den Worten aus: „Es sei $m$ die Anzahl der vorhandenen Kreuzungspunkte, d. h. der Punkte, in denen

---

[1]) Rep. of the Brit. Ass. 1876, p. 36: Rep. of the Committee ... for testing experimentally Ohm's Law.

[2]) Wheatstone (Pogg. Ann. LXII, S. 499, 1844) behandelte dieses Problem bei der Theorie des nach ihm benannten Apparates zur Vergleichung von Widerständen, der Wheatstone'schen Brücke. Poggendorff (Pogg. Ann. LXVII, S. 273) stellte Formeln für die Benutzung desselben Apparates auf und prüfte deren Richtigkeit experimentell mit W. Weber.

[3]) Pogg. Ann. LXIV, S. 497; Gesammelte Abhandl., Leipzig 1882, S. 1. — Gustav Robert Kirchhoff wurde am 12. März 1824 in Königsberg geboren, habilitirte sich 1847 als Privatdocent in Berlin, wurde 1850 ausserordentlicher Professor in Breslau, 1854 ordentlicher Professor der Physik in Heidelberg und ging 1874 als solcher nach Berlin, wo er, schon seit längerer Zeit kränklich, am 17. Oct. 1887 starb. Seine in verschiedenen Zeitschriften zerstreuten Abhandlungen erschienen als „Gesammelte Abhandlungen“, Leipzig 1882. Seine „Vorlesungen über mathematische Physik: Mechanik“ kamen seit 1876 in drei Auflagen heraus.

[4]) Gesammelte Abhandl., S. 15.

[5]) Pogg. Ann. LXXII, S. 497, 1847; Gesammelte Abhandl., S. 22.

zwei oder mehrere Drähte zusammenstossen, und es sei $\mu = n$[1] $- m + 1$, dann ist der gemeinschaftliche Nenner aller Grössen $I$ die Summe derjenigen Combinationen von $w_1, w_2, \ldots w_n$ zu je $\mu$ Elementen $w_{k1} . w_{k2} \ldots w_{k_\mu}$, welche die Eigenschaft haben, dass nach Fortnahme der Drähte $k_1, k_2, \ldots k_\mu$ keine geschlossene Figur übrig bleibt, und es ist der Zähler von $I_\lambda$ die Summe derjenigen Combinationen von $w_1, w_2 \ldots w_n$ zu je $\mu - 1$ Elementen $w_{k1} . w_{k2} \ldots w_{k_{\mu-1}}$, welche die Eigenschaft haben, dass nach Fortnahme von $k_1, k_2 \ldots . k_{\mu-1}$ eine geschlossene Figur übrig bleibt und dass in dieser $\lambda$ vorkommt; eine jede Combination multiplicirt mit der Summe der elektromotorischen Kräfte, welche sich auf der zugehörigen geschlossenen Figur befinden. Die elektromotorischen Kräfte sind hierbei in der Richtung als positiv zu rechnen, in der $I_\lambda$ als positiv gerechnet ist"[2]. Die Beweise für seine Sätze hatte Kirchhoff vor der Hand nur unter der Voraussetzung linearer Leiter gegeben. Im nächsten Jahre[3] aber dehnte er dieselben auch auf körperliche Leiter, die sich wie die Drähte der linearen Form nähern, und damit auf die Leiter von allen den Formen aus, wie sie überhaupt bei den Versuchen gebräuchlich sind.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860

Während man so bemüht war, für eine mathematische Behandlung der dynamischen Elektricität den richtigen Grund zu legen, blieb man auch in der mathematischen Behandlung der statischen Elektricität nicht müssig, da sich gerade in den Problemen aus dem letzteren Gebiete schätzbares Material für eine ruhmvolle Bethätigung mathematischer Genialität bot. Da die elektrischen Flüssigkeiten nach Coulomb zu den Materien gehören, welche im directen Verhältniss der Massen und im umgekehrt quadratischen Verhältnisse der Entfernungen wirken, so war Gauss' berühmtes Werk „Allgemeine Lehrsätze in Beziehung auf die im verkehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung wirkenden Anziehungs- und Abstossungskräfte"[4] auch auf alle Probleme der statischen Elektricität anwendbar. In seinen Bahnen wandelte Lejeune-Dirichlet, während Riemann sich später directer an Green's Arbeiten anschloss. Auf deutschem Boden führten dann Neumann, W. Weber, Kirchhoff und Clausius vor Allem, in England W. Thomson und Clerk-Maxwell die Untersuchungen erfolgreich weiter. Systematische Werke aber, die alles bis dahin in der mathematischen Elektricitätslehre Erreichte verwertheten, gaben besonders Clausius[5] und Clerk-Maxwell[6]. Für die statische Elek-

---

[1] $n$ ist die Anzahl der überhaupt mit einander verbundenen Leitungsdrähte.

[2] Gesammelte Abhandl., S. 23.

[3] Pogg. Ann. LXXV, S. 189, 1848; Gesamm. Abhandl., S. 33.

[4] Resultate aus den Beobachtungen des magnet. Ver. im Jahre 1839; auch Sämmtliche Werke, Bd. V, S. 195.

[5] Die mechanische Behandlung der Elektricität, Braunschw. 1879.

[6] A treatise on electricity and magnetism, sec. ed., London 1881, übers. Lehrbuch der Elektricität und des Magnetismus, Berlin 1883.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

tricität handelte es sich bei diesen Untersuchungen hauptsächlich um die Vertheilung der elektrischen Massen auf einzelnen beliebig gestalteten Flächen und Körpern, sowie um die Influenzwirkung mehrerer Körper auf einander. Doch waren die auftretenden mathematischen Schwierigkeiten so gross, dass man nur bei den allereinfachsten Flächen und Körpern zu einem glücklichen Resultate gelangte.

Zur Messung der Mengen statischer Elektricität hatte man bis in die vierziger Jahre die alten Goldblatt-Elektroskope noch mit Vorliebe angewandt; für die Verification der mathematisch erlangten Resultate aber zeigten sich dieselben nun zu ungenau und unzuverlässig. Das Interesse concentrirte sich darum auf die Verbesserung der Coulomb'schen Drehwage, die man bis dahin als zu difficil in der Behandlung und deshalb auch unsicher in den Resultaten ziemlich vernachlässigt hatte. Als Nachtheile derselben waren vor Allem die nicht genügende Fixirung der Anfangslage des Wagebalkens wie die Veränderlichkeit der Torsion des Aufhängefadens hervorgetreten. Snow Harris hatte zur Vermeidung dieser Nachtheile auch schon [1]) eine bifilare Aufhängung des Wagebalkens versucht, aber die Erfolge hatten den Erwartungen nicht entsprochen. Peltier [2]) war um dieselbe Zeit auf eine Idee von Schweigger [3]) zurückgegangen und hatte den Wagebalken durch eine auf einer Spitze schwebende Magnetnadel ersetzt, ebenfalls ohne weitere Beachtung zu finden. Fruchtbar wurde erst die Vereinigung der Einrichtungen von Coulomb und Schweigger, wie sie Oersted im Jahre 1840 [4]) ins Werk setzte. Er vertauschte nämlich das Schellackstäbchen Coulomb's mit einem Messingstäbchen, an das zum Befestigen des Fadens ein schwach magnetischer Eisenbügel angelöthet war, dessen Magnetismus auch dem Messingbalken eine feste Anfangsrichtung wahrte. Die Zuleitung der Elektricität erfolgte nicht durch eine Kugel, sondern durch zwei Messingarme, die auf die beiden Enden des Wagebalkens wirkten. Dellmann, der schon im Jahre 1840 [5]) die Drehwage Coulomb's fast unverändert zu seinen Beobachtungen der atmosphärischen Elektricität gebraucht hatte, änderte dieselbe danach im Jahre 1842 [6]) in so weit ab, als er von Oersted das Messingstäbchen als Wagebalken aufnahm und die Zuleitung der Elektricität, wie das schon Peltier gethan, durch ein zweites Messingstäbchen bewirkte, welches dem Balken parallel unter demselben lag und also mit

---

[1]) Phil. Trans. 1836, p. 417.

[2]) Ann. de chim. et de phys. [2] LXII, p. 422, 1836.

[3]) Siehe S. 195 dieses Bandes.

[4]) Pogg. Ann. LIII, S. 612.

[5]) Pogg. Ann. LIII, S. 606, 1841. — Friedr. Dellmann, 1805 bis 1870, Professor am Gymnasium in Kreuznach.

[6]) Ueber Oersted's Elektrometer und ein neues Instrument der Art. (Pogg. Ann. LV, S. 301, 1842.)

seiner ganzen Länge auf denselben wirkte. Zur Fixirung der Anfangslage wurde der wieder unmagnetische Wagebalken mit einer Einbiegung versehen, so dass er mit der einen Hälfte an die eine Seite des Zuleitungsstabes, mit der anderen Hälfte an die andere Seite angelegt werden konnte. Romershausen nahm 1846 [1]) statt des Zuleitungsdrahtes einen Streifen, den er in der Mitte einschnitt und an beiden Hälften nach entgegengesetzten Seiten aus einander bog, so dass der gerade Wagebalken in die Biegung eingelegt werden konnte. Kohlrausch [2]) endlich schloss 1847 den Entwickelungsgang des Instrumentes in einem gewissen Grade ab. Er vertauschte den Coconfaden mit einem Glasfaden von stärkerer Torsionskraft, führte zur bequemeren Ladung von dem Zuleitungsstreifen aus ein Stäbchen isolirt durch den Boden des Gefässes, trocknete die Luft in demselben durch concentrirte Schwefelsäure, ersetzte die gläserne Seitenwand und den Boden des Gefässes (zur Vermeidung von elektrischen Ladungen derselben) durch Metallwände und liess nur die Decke aus Glas bestehen, durch welches hindurch er mit einer Lupe die Ablenkung des Wagebalkens beobachtete. Mit einem solchen Apparate führte dann Kohlrausch die oben erwähnte Prüfung des Ohm'schen Gesetzes, wie auch der Kirchhoff'schen Formeln für die Stromintensitäten bei Stromverzweigungen aus. Ein anderes Instrument, das ganz der Sinusboussole nachgebildet war und auch Sinuselektrometer genannt wurde, construirte er noch im Jahre 1853 [3]), und ein nur wenig davon abweichendes Elektrometer gebrauchte Riess von 1855 [4]) an bei seinen Messungen [5]).

Die elektrostatischen Messungen zeigten wieder zur Evidenz

---

[1]) Pogg. Ann. LXIX, S. 71. — Elard R., 1784—1857, Pfarrer in Acken a. d. Elbe.

[2]) Ueber das Dellmann'sche Elektrometer, Pogg. Ann. LXXII, S. 353 u. LXXIV, S. 499. — Rudolph Kohlrausch (6. Nov. 1809 Göttingen — 9. März 1858 Erlangen), Lehrer der Physik in Lüneburg, Rinteln, Cassel, Marburg, 1857 ordentl. Professor d. Physik in Erlangen.

[3]) Pogg. Ann. LXXXVIII, S. 497.

[4]) Pogg. Ann. XCVI, S. 513.

[5]) Auf die neueren Elektrometer, welche an Feinheit und Präcision diese älteren noch bedeutend übertreffen, können wir nicht näher eingehen. Die vollkommensten derselben, auf die auch die anderen meist zurückzuführen, sind das Quadrantenelektrometer und das absolute Elektrometer von W. Thomson. Das erstere ist principiell der Coulomb'schen Wage nachgebildet, das zweite aber benutzt als Messapparat zwei parallele, entgegengesetzt elektrisirte Platten; indem die Anziehung dieser Platten direct durch ein Gegengewicht gemessen werden kann, erlaubt es die directe Zurückführung der elektrischen Kräfte auf absolutes mechanisches Maass. Die erste Idee zu dieser Art der Messung gab übrigens Snow Harris schon in einer Abhandlung in den Phil. Trans. 1834, p. 215. W. Thomson beschrieb seine Elektrometer zuerst in Rep. of the Brit. Ass. 1855, Trans. of the sect., p. 22, dann ausführlich in Rep. of the Brit. Ass. 1867, p. 489. Vergl. auch Wiedemann, Die Lehre von der Elektricität, I, S. 165; Cl. Maxwell, Lehrbuch der Elektricität und des Magnetismus, I, S. 343.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

theils direct, theils durch Verification mathematisch abgeleiteter Resultate, dass die elektrostatischen wie die magnetischen Kräfte alle von dem Coulomb'schen Gesetz der Wirkung proportional den Massen und umgekehrt proportional den Quadraten der Entfernung beherrscht werden und dasselbe ohne Ausnahme befolgen. Viele Physiker konnten danach nicht umhin, zu vermuthen, dass diese Wirkungsart als eine fundamentale Eigenthümlichkeit aller Naturkräfte anzusehen sei, und sie schlossen daraus weiter, dass nach Analogie der Gravitationserscheinungen auch alle anderen Naturerscheinungen auf unvermittelte Fernwirkungen als ihre Ursachen zurückgeführt werden müssten. Mit dieser so streng gedachten Einheit der Natur, bei der es sogar schwer war, die Möglichkeit der verschiedenartigen natürlichen Kraftwirkungen noch einzusehen, waren aber die elektrodynamischen Erscheinungen durchaus unvereinbar. Die Newton'sche Auffassung kannte keine andere Abhängigkeit der Kräfte als von der Masse und Entfernung der Körper; das Gesetz über die Summation der durch eine beschleunigende Kraft einem Körper mitgetheilten Geschwindigkeiten, das Summationsgesetz der Kräfte überhaupt, so wie es Newton in aller Strenge ausgesprochen hatte, widersprach direct einer Abhängigkeit der Kraftwirkung von der Bewegung der wirkenden Körper, und kein Astronom hatte jemals bei seinen Rechnungen eine Abhängigkeit der Gravitation von den kosmischen Geschwindigkeiten der gravitirenden Körper auch nur in Betracht gezogen. Die elektrodynamischen Kräfte dagegen setzten die Bewegung der wirkenden Massen absolut voraus und waren ganz augenscheinlich wenigstens insofern von dem Bewegungszustande derselben abhängig, als sie im Ruhezustande der Elektricität überhaupt nicht auftraten und ihrem Begriff nach die Bewegung forderten.

Ampère hatte sich nicht weiter um diesen Gegensatz gekümmert. Er hatte den Begriff der Stromstärke oder Stromintensität als einen fundamentalen Begriff eingeführt und jede Erörterung über die Herleitung dieser Kraft aus den Kräften der elektrischen Flüssigkeiten vermieden. Indem er dann die elektrodynamische Wirkung zweier Elemente der Stromkreise auf einander dem Product aus den Stromintensitäten direct und einer Potenz der Entfernung umgekehrt proportional setzte, behielt er scheinbar zwar die allgemeine Newton'sche Form des Attractionsgesetzes zunächst noch bei, seine Formel aber war danach keiner Deduction aus den fundamentalen Eigenschaften der Elektricität, sondern nur einer empirischen Bewahrheitung fähig, und zeigte ihren rein empirischen Charakter auch darin, dass sie nur eine Anwendung auf ihr speciellstes Gebiet, die Wechselwirkung zweier elektrischen Ströme, erlaubte. Die Ampère'sche Formel entsprach keiner allgemeinen Anschauung vom

Wesen einer neuen Kraftwirkung, sondern sie war nur der Ausdruck einer rein empirischen Thatsache. Dies betonte W. Weber bei seiner Ableitung eines neuen elektrischen Grundgesetzes mit besonderem Nachdruck, indem er zum weiteren Beweise für diese Ansicht darauf aufmerksam machte, dass Ampère's Formel sich keineswegs als ein wahres Naturgesetz, wie z. B. das Gravitationsgesetz, weiter fruchtbar als Wegweiser zu neuen Entdeckungen, zur Erforschung verschiedener verwandter Classen von Erscheinungen erwiesen habe, dass vielmehr alle folgenden Fortschritte, wie z. B. die Entdeckung der Induction und ihrer Gesetze, unabhängig von Ampère's Theorie gewonnen worden seien [1]). Weber hält für nothwendig, dass die beiden Wirkungsgesetze, die bis jetzt für die elektrostatischen und elektrodynamischen Wirkungen gesondert gültig erscheinen, das Coulomb'sche und das von Ampère, in eines zusammengezogen werden müssen, das alle elektrischen Erscheinungen umfasst. Dazu gehört vor Allem, dass der Begriff der Stromintensität auf die fundamentalen Vorstellungen von der Wechselwirkung elektrischer Massen zurückgeführt wird [2]).

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

Die dynamische Wirkung eines Stromes kann nur abhängen von der Masse der Elektricität, die in einer bestimmten Zeit in einem Punkte zur Action kommt, oder die Stromintensität muss proportional sein der Menge der Elektricität, welche während der Zeit-

---

[1]) Elektrodynamische Maassbestimmungen, I. Abh., Abhandl. bei Begründung der K. sächs. Gesellsch. der Wissensch. 1846; Auszug in Pogg. Ann. LXXIII, S. 193, 1848.

[2]) Eine solche Zurückführung hatte Fechner schon im Jahre 1845 in einer Abhandlung „Ueber die Verknüpfung von Faraday's Inductionserscheinungen mit den Ampère'schen elektrodynamischen Erscheinungen" (Pogg. Ann. LXIV, S. 337) versucht, und W. Weber benutzte theilweise Fechner's Fundamente. Fechner sagt im Anfange seiner Abhandlung: „Bisher hat man allerdings die Wirkung der Stromelemente im Ganzen auf einander in Betracht gezogen; offenbar aber steht der Analyse der Totalwirkung in die Wirkung der einzelnen Bestandtheile . . . nichts im Wege, sofern sie einerseits den erfahrungsmässigen Erfolg wiedergiebt, andererseits eben von hieraus sich ein Weg zur verlangten Verknüpfung finden lässt" (S. 338). Die Principien dieser Verknüpfung sind dann folgende: 1) „Jede Wirkung eines Stromelementes lässt sich ansehen als zusammengesetzt aus der Wirkung eines positiven und eines gleich starken negativen Elektricitätstheilchens, die gleichzeitig dasselbe Raumelement im entgegengesetzten Sinne durchlaufen; 2) die Wirkung zweier Stromelemente auf einander lässt sich mit Rücksicht auf diese Zusammensetzung durch die Voraussetzung repräsentiren, dass gleichartige Elektricitäten anziehend auf einander wirken, wenn sie in gleichem Sinne oder nach einer gemeinschaftlichen Winkelspitze hingehen, entgegengesetzte Elektricitäten aber, wenn sie in entgegengesetztem Sinne gehen oder so, dass die eine sich der gemeinschaftlichen Winkelspitze nähert, während sich die andere davon entfernt" (S. 338).

einheit durch jeden Querschnitt des Leitungsdrahtes geht. Bezeichnet man also mit $e$ die Masse der positiven Elektricität, welche in einer Längeneinheit des Leitungsdrahtes enthalten ist, mit $u$ die Geschwindigkeit derselben, so muss die Intensität $i$ des positiven Stromes dem Product $eu$ proportional oder es muss $i = aeu$ sein, wenn $a$ das constante Verhältniss zwischen Masse und Wirkungsfähigkeit bezeichnet. Von dieser Definition der Stromintensität aus bleiben nun zwei Wege zum elektrodynamischen Grundgesetze übrig; entweder man zeigt, wie sich aus den elementaren Wirkungen die thatsächlich auftretenden zusammensetzen, oder man zerlegt die Ampère'sche Formel, die das Gesammtresultat der Wirkungen angiebt, in Bestandtheile, welche den Elementarwirkungen entsprechen. Weber schlug beide Wege ein.

Setzt man in die Ampère'sche Formel [1]) für die Stromintensitäten die Weber'schen Ausdrücke ein, so erhält man

$$\frac{e e' ds\, ds'}{r^2}\, a^2 u u'_1 \left(\cos\varepsilon - \frac{3}{2}\cos\vartheta\cos\vartheta_1\right)$$

oder auch

$$\frac{e e' ds\, ds'}{r^2}\, a^2 u u' \left(\frac{1}{2}\frac{dr}{ds}\cdot\frac{dr}{ds'} - r\frac{d^2 r}{ds\, ds'}\right),$$

wenn man mit Ampère

$\frac{dr}{ds}$ für $\cos\vartheta$, $-\frac{dr}{ds'}$ für $\cos\vartheta_1$ und $-r\frac{d^2 r}{ds\, ds'} - \frac{dr}{ds}\cdot\frac{dr}{ds'}$ für $\cos\varepsilon$

substituirt. Nehmen wir nun an, wie das nach der dualistischen Theorie der Elektricität nothwendig ist, dass durch jedes Stromelement gleichzeitig immer zwei entgegengesetzt gerichtete elektrische Ströme von gleichen Mengen positiver und negativer Elektricität fliessen, dann setzt sich die Wirkung zweier Stromelemente aus vier Elementarwirkungen, nämlich zwei Anziehungen und zwei Abstossungen, zusammen. Der vorher gegebene Ausdruck bezeichnet danach die Grösse der Abstossung, welche die beiden positiven Elektricitäten in den beiden Stromelementen auf einander ausüben, und für die drei anderen Wirkungen können wir noch drei andere ganz ähnliche Formeln entwickeln. Aus diesen Formeln lassen sich dann die Grössen $\frac{dr}{ds}$, $\frac{dr}{ds'}$ u. s. w. eliminiren und durch die Geschwindigkeiten ersetzen. Bedenkt man nämlich, dass die Entfernungen $r$ von der Lage der Elemente im Stromkreise, also von $s$ und damit auch von der Zeit $t$ abhängig sind, so erhält man durch zweimalige Differentiation

$$\frac{dr}{dt} = \frac{dr}{ds}\frac{ds}{dt} + \frac{dr}{ds'}\frac{ds'}{dt}$$

---

[1]) Siehe S. 204 dieses Bandes.

und $$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{d^2 r}{ds^2}\left(\frac{ds}{dt}\right)^2 + 2\frac{d^2 r}{ds\,ds'}\cdot\frac{ds}{dt}\cdot\frac{ds'}{dt} + \frac{d^2 r}{ds'^2}\left(\frac{ds'}{dt}\right)^2$$

oder, wenn man $u$ statt $\frac{ds}{dt}$ und $u'$ statt $\frac{ds'}{dt}$ setzt und die erste dieser Formeln quadrirt,

$$2uu'\frac{dr}{ds}\frac{dr}{ds'} = \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 - u^2\left(\frac{dr}{ds}\right)^2 - u'^2\left(\frac{dr}{ds'}\right)^2$$

und

$$2uu'\frac{d^2 r}{ds\,ds'} = \frac{d^2 r}{dt^2} - u^2\frac{d^2 r}{ds^2} - u'^2\frac{d^2 r}{ds'^2}.$$

Substituirt man noch diese Werthe in die oben für die elektrodynamische Wirkung zweier positiven Elemente entwickelte Formel, bildet für die drei anderen Wirkungen die entsprechenden Werthe und addirt zuletzt die vier erhaltenen Ausdrücke, so erhält man für die gesammte Wirkung der beiden Stromelemente die Formel

$$-\frac{ee'\,ds\,ds'}{r^2}\frac{a^2}{16}\left[\left(\frac{dr_{\text{I}}}{dt}\right)^2 - \left(\frac{dr_{\text{II}}}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dr_{\text{III}}}{dt}\right)^2 - \left(\frac{dr_{\text{IV}}}{dt}\right)^2 - 2r\left(\frac{d^2 r_{\text{I}}}{dt^2} - \frac{d^2 r_{\text{II}}}{dt^2} + \frac{d^2 r_{\text{III}}}{dt^2} - \frac{d^2 r_{\text{IV}}}{dt^2}\right)\right],$$

wobei nur zu berücksichtigen ist, dass alle $\frac{dr}{ds}$ und $\frac{d^2 r}{ds}$, deren $ds$ sich auf Elemente eines Leitungsdrahtes beziehen, einander gleich sein müssen und dass die Ampère'sche Formel, welche die ganze Wirkung giebt, hier viermal angewandt und summirt worden ist. Jene Formel aber lässt sich nun wieder in vier Theile zerlegen, welche alle die Gestalt

$$-\frac{ee'\,ds\,ds}{r^2}\frac{a^2}{16}\left[\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 - 2r\frac{d^2 r}{dt^2}\right]$$

haben und die alle durch Verwandlung der Zeichen von $e$ und $e'$ in einander übergehen. Sie bezeichnen einzeln die vier elementaren Wirkungen der vier in den Stromelementen fliessenden Elektricitäten, und jene Formel ist als das allgemeine Gesetz der Wechselwirkung bewegter Elektricitätsmengen anzusehen. Diesem Ausdruck lässt sich nun, da er keine Stromintensitäten mehr, sondern nur noch Elektricitätsmengen und da er die Wirkungen der verschiedenen Elektricitäten gesondert enthält, leicht noch der Ausdruck für die statische Wirkung der Elektricitäten anfügen. Die Wirkung zweier elektrischen Massen $e\,ds$ und $e'ds'$ auf einander wird dann ganz allgemein, gleichgültig, ob die Elektricitätsmengen in Ruhe oder Bewegung sich befinden,

$$\frac{ee'\,ds\,ds'}{r^2}\left[1 - \frac{a^2}{16}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + \frac{a^2 r}{8}\cdot\frac{d^2 r}{dt^2}\right]$$

oder wenn wir die relative, auf ihre Verbindungslinie bezogene Geschwindigkeit der beiden elektrischen Massen mit $v$ bezeichnen,

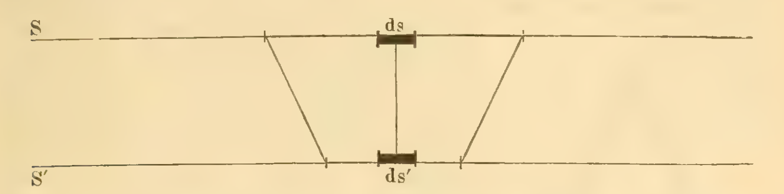
$$\frac{ee'\,ds\,ds'}{r^2}\left(1-\frac{a^2}{16}\,v^2+\frac{a^2r}{8}\cdot\frac{dv}{dt}\right).$$

Weber war also durch die Ampère'sche Formel zu dem Resultate gekommen, dass die Wirkung elektrischer Massen auf einander nicht nur von der elektrischen Materie als solcher, sondern auch von ihrem Bewegungszustande, ihrer Geschwindigkeit und ihrer Beschleunigung abhängt.

Dasselbe Resultat musste sich unabhängig von Ampère auch aus den elektrodynamischen Fundamentalversuchen ableiten lassen. Denkt man sich zwei Elemente positiver Elektricität $e$ und $e'$ in zwei Leitungsdrähten strömend, so wird ihre elektrostatische Abstossung $\frac{ee'}{r^2}$ durch die Bewegung verändert werden müssen, sonst würde überhaupt keine elektrodynamische Wirkung möglich sein. Es fragt sich nun zuerst, ob die Bewegung die Kraft vergrössert oder schwächt. Betrachten wir zwei Elemente, die in einer geraden Linie liegen und gleich gerichtet sind, so haben wir es mit zwei Abstossungen zweier gleichgerichteten positiven oder negativen Elektricitäten und zwei Anziehungen einer negativen und einer positiven Elektricitätsmenge zu thun. Da nun im vorliegenden Falle als resultirende Kraft eine Abstossung auftritt und also die Abstossungen der Elemente von geringerer relativer Geschwindigkeit die Anziehungen der Elemente von grösserer relativer Geschwindigkeit überwiegen, so muss die Geschwindigkeit eine Schwächung der elektrostatischen Kräfte hervorbringen, weil man doch eine Stärkung der Kräfte durch die Geschwindigkeit nicht annehmen kann. Die Abstossung bleibt aber ganz dieselbe, auch wenn die Richtung der Ströme sich in ihr Gegentheil verkehrt, die Schwächung der Kraft kann darum nicht von einer ungeraden, sondern nur von einer geraden Potenz der Geschwindigkeit abhängen. Nehmen wir das Einfachste, dass die Schwächung der zweiten Potenz der Geschwindigkeit proportional ist, wofür auch das Gesetz der Kraftwirkung aller bewegten Massen spricht, so können wir die Wirkung zweier Stromtheilchen auf einander gleich $\frac{ee'\,ds\,ds'}{r^2}\,(1-av^2)$ setzen, wo $a$ wieder eine noch unbestimmte Constante und $v$ die relative Geschwindigkeit der beiden Theilchen bedeuten. Dieser Ausdruck reicht aber für die elektrischen Wirkungen noch nicht aus. Denken wir uns zwei parallele und gleichgerichtete Strombahnen $S$ und $S'$ (s. d. Figur), bei denen in $S$ die grössere Stromintensität und also die grössere Geschwindigkeit herrscht, und denken wir uns die Stromelemente $ds$ und $ds'$ einander direct gegenüber liegend, so ist in diesem Falle die relative Geschwindigkeit der Elektricitäten gerade Null, sie hat vorher bis zu Null abgenommen und wächst dann wieder. Da aber in dem Punkte, wo die relativen Geschwindigkeiten Null sind, immer noch eine elektrodynamische Wirkung und zwar eine Anziehung übrig

bleibt, so kann diese Wirkung nicht bloss von der relativen Geschwindigkeit, sondern muss auch ausserdem noch von der Beschleunigung und zwar so abhängen, dass der Einfluss der letzteren dem der Geschwindigkeit entgegengesetzt ist. Wir müssen also dem für die elektrische Kraft schon erhaltenen Ausdrucke noch ein der Beschleunigung proportionales Glied hinzufügen. Die elektrische Wirkung zweier be-

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.




wegter Elektricitäten auf einander wird demnach, wenn $b$ noch eine zweite unbestimmte Constante bedeutet, gleich

$$\frac{ee_1' \, ds \, ds'}{r^2}\left(1 - av^2 + b\,\frac{dv}{dt}\right)$$

zu setzen sein. Addirt man dann noch die entsprechenden Wirkungen der vier in den zwei Strömen fliessenden Elektricitätsmengen und vergleicht die Summe mit der Ampère'schen Formel, so erhält man daraus für die Wirkung zweier bewegter Elektricitätsmengen wieder die frühere Formel

$$\frac{ee' \, ds \, ds'}{r^2}\left(1 - \frac{a^2}{16}\,v^2 + \frac{a^2 r}{8}\cdot\frac{dv}{dt}\right).$$

Die hier noch unbestimmte Constante $a$ lässt sich auf anschaulichere Weise ausdrücken. Nehmen wir an, dass die Ströme eine so grosse constante, relative Geschwindigkeit $c$ haben, dass die elektrische Wechselwirkung derselben Null wird, so muss $1 - \frac{a^2}{16}\cdot c^2 = 0$ oder $a = \frac{4}{c}$ sein, wonach man den Ausdruck für die Wechselwirkung bewegter Elektricitätsmengen auch

$$W = \frac{ee' \, ds \, ds'}{r^2}\left[1 - \frac{1}{c^2}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + \frac{2r}{c^2}\,\frac{d^2 r}{dt^2}\right]$$

schreiben kann.

Weber's elektrisches Kraftgesetz war eine revolutionäre That ersten Ranges, die weit tragende Folgen voraussehen liess. Seit Newton hatte man alle Kraftwirkungen in letzter Instanz auf Fundamentaleigenschaften der Materie zurückgeführt, die in ihren Wirkungen von dem Bewegungszustande der Materie ganz unabhängig waren. Nach Weber aber wird diese fundamentale Wirkung durch die Bewegung modificirt, und nicht bloss die Geschwindigkeit, sondern sogar die Beschleunigung führt neue, von den Eigenschaften der ruhenden Materien unabhängige Kräfte ins Spiel. Die einheitliche Newton'-

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

sche Ansicht von der Kraft, die man schon für das ganze Gebiet der Physik gesichert glaubte, wurde somit durch das alte revolutionäre Element, die Elektricität, abermals in Frage gestellt und eine Hinneigung zu den alten Vorstellungen von der Bewegung als dem eigentlichen Kräfte producirenden Elemente schien darin unverkennbar. Indessen war damals bei den Physikern noch wenig Neigung vorhanden, auf Fragen so principieller Natur auch auf diesem Gebiete näher einzugehen, und so erhoben sich gegen die neue Anschauung von der Wirkung der elektrischen Kräfte zu jener Zeit noch keine weiteren Bedenken[1]). Dagegen musste Weber sich nothwendig mit den Arbeiten anderer Physiker aus einander setzen, welche die Erscheinungen der galvanischen Induction vor Allem von ganz anderem Grunde aus und doch in ihren Resultaten den Beobachtungen entsprechend abgeleitet hatten.



Schon im Jahre 1845, also noch vor Weber's Abhandlungen waren zwei solcher Arbeiten von H. Grassmann und Fr. Neumann erschienen, welche eine Theorie der galvanischen Induction gaben, ohne neue fundamentale Annahmen über die Wirkungsart der elektrischen Kräfte zu machen.

Grassmann[2]) erklärte Ampère's elektrodynamisches Gesetz in Bezug auf geschlossene Ströme für unzweifelhaft richtig, hielt aber die Anwendung desselben auf Stromtheile oder Stromelemente für unthunlich, erstens, weil das Gesetz voraussetzt, dass die Richtung der Wechselwirkung zweier unendlich kleinen Stromtheile in die Verbindungslinie derselben fällt, und zweitens, weil man aus der Formel für parallele Strom-

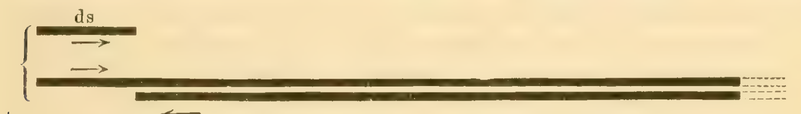
[1]) Charakteristischer Weise sagt Krönig, der Mitbegründer der mechanischen Wärmetheorie, noch im Jahre 1864 (Pogg. Ann. CXXIII, S. 305): „Die neuere Naturforschung ist, soweit meine Kenntniss derselben reicht, durchaus der Ansicht, dass alle Kräfte nur als Functionen von Entfernungen, nicht aber als Functionen von Geschwindigkeiten zu betrachten sind."

[2]) Neue Theorie der Elektrodynamik, Pogg. Ann. LXIV, S. 1, 1845. Hermann Günther Grassmann (15. April 1809 Stettin — 26. Sept. 1877 Stettin), Sohn von Justus Grassmann (dem Erfinder des Grassmann'schen Luftpumpenhahnes), studirte Theologie in Berlin, machte aber später, ohne mathematische Vorlesungen gehört zu haben, das Examen pro facultate docendi für Mathematik und Physik, 1843 wurde er Lehrer an der Stettiner Realschule und 1852 am dortigen Gymnasium. 1844 und 1862 veröffentlichte er seine Schriften über „Die Ausdehnungslehre", die aber erst seit dem Ende der siebziger Jahre Anerkennung fanden (Mathematische Annalen XIV, S. 1).

elemente ein Verschwinden der elektrodynamischen Wirkung in allen den Fällen erhält, wo der Cosinus des Winkels, den die Elemente mit der Verbindungslinie ihrer Mittelpunkte bilden, gleich $\sqrt{2/3}$ ist. Er ging danach zur Ableitung eines neuen elektrodynamischen Grundgesetzes von der Wirkung eines Winkelstromes auf ein Element aus, das mit seinem Anfangspunkte wenigstens in der Winkelebene liegt. Da der Winkelstrom im Unendlichen geschlossen gedacht werden kann (s. d. Fig. a. S. 508), so muss für ihn das Ampère'sche Gesetz gültig sein. Nimmt man nun mit Ampère noch an, dass der Winkelstrom auf ein Stromelement nur der Projection des letzteren auf der Ebene des Stromes proportional wirkt, so erhält man aus der Ampère'schen Formel für diese Wirkung den Werth

$$W = \frac{i b_1}{r} \left( cotg \frac{\alpha}{2} - cotg \frac{\alpha'}{2} \right),$$

wo $i$ die Intensität des Winkelstromes, $b_1$ die Projection der Intensität des Stromelementes, $r$ die Entfernung des Winkelscheitels vom Anfangspunkte des Stromelementes und $\alpha$ und $\alpha'$ die Winkel dieser Entfernung




mit den Winkelschenkeln sind. Dieser Ausdruck stellt aber in seinen beiden Theilen offenbar die Wirkungen der einzelnen Schenkel auf das Element dar, und die Wirkung eines von einem Punkte aus ins Unendliche laufenden Strahles auf ein Stromelement muss danach

$$W = \frac{i b_1}{r} cotg \frac{\alpha}{2}$$

sein. Fasst man dann endlich das anziehende Stromelement als eine Vereinigung zweier, nach einer Seite unendlicher Strahlen auf, welche die Richtung und Intensität dieses Elementes haben, und von denen der eine in gleicher Richtung wie das Element, der andere in entgegengesetzter Richtung von dem (positiven) Strome durchflossen wird, während der erste den Anfangspunkt des Elementes zu seinem Anfangspunkte, der andere diesen Punkt zu seinem Endpunkte hat (s. obenstehende Figur), so erhält man leicht

$$W = \frac{a b_1}{r} \sin \alpha$$

als Ausdruck der Wirkung, welche ein Stromelement $a$ auf ein anderes, um $r$ von ihm entferntes $b$ ausübt, wo nun $b_1$ die senkrechte Projection des letzteren auf die durch $a$ und $r$ gelegte Ebene und $\alpha$ den Winkel darstellt, welchen $a$ mit dem nach $b$ gezogenen Strahle bildet. Die Bewegung erfolgt dabei senkrecht gegen $b$ (oder $b_1$) in der durch $a$ und $r$ gehenden Ebene nach derjenigen Seite hin, nach welcher der Schenkel $a$

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

des Winkels $\alpha$ von dem anderen Schenkel aus betrachtet wird[1]). Das ist das Grassmann'sche elektrodynamische Grundgesetz, das jedenfalls einen Vortheil der Einfachheit für sich hat[2]). Gegen die Richtigkeit desselben aber hat man eingewendet[3]), dass es das Princip der Gleichheit zwischen Action und Reaction nicht wahrt, indem es wohl die Wirkung eines als Stromende angesehenen Elementes auf ein Stromelement, aber nicht die umgekehrte Wirkung angiebt. Dabei muss man jedenfalls bemerken, dass auch Grassmann die elektrodynamische Wirkung nur bis auf Stromelemente, nicht bis auf die Kräfte der elektrischen Massen zurückführt.

Neumann[4]) ging bei seiner Betrachtung der elektrodynamischen Wirkungen von den Erscheinungen der galvanischen Induction aus, kam aber dabei auch auf die Ableitung der elektrodynamischen Wirkungen der elektrischen Elemente auf einander. Seinen Entwickelungen legte er folgende fünf Erfahrungssätze zu Grunde: 1) Inducirte Ströme entstehen jedesmal, wo die virtuelle Wirkung des inducirenden Stromes auf den Leiter eine Aenderung erfährt; 2) die inducirte elektromotorische Kraft ist unabhängig von der Substanz des Leiters; 3) unter sonst gleichen Umständen ist die elektromotorische Kraft der Geschwindigkeit proportional, mit welcher die Elemente bewegt werden; 4) die Componente nach der Richtung der Bewegung von der elektrodynamischen Wirkung, welche der inducirende Strom auf den inducirten ausübt, ist immer negativ; 5) unter sonst gleichen Umständen ist die inducirte Stromstärke der inducirenden proportional. Aus diesen Sätzen bildete er mathematisch ohne weitere Annahmen Ausdrücke für die inducirte Stromstärke und für die inducirte motorische Kraft. Denkt man sich nämlich einen Leiter derart in Bewegung, dass alle seine Elemente dieselbe Geschwindigkeit $v$ haben, und bezeichnet man die in die Richtung der Bewegung fallende Componente der elektrodynamischen Wirkung eines galvanischen Stromes auf ein von der Stromeinheit durchflossenes Element $ds$ jenes Leiters mit $Cds$, so folgt aus

---

[1]) Pogg. Ann. LXIV, S. 9.

[2]) Auf eine merkwürdige Analogie zwischen seinem elektrodynamischen Grundgesetze und dem Gravitationsgesetze macht Grassmann (Pogg. Ann. LXIV, S. 11 bis 12) aufmerksam. Nach seiner „Ausdehnungslehre" (Leipzig 1844, 2. Aufl. 1878) kann man als das Product zweier mit bestimmten Kraftintensitäten wirkenden Punkte die mit dem Producte der Intensitäten multiplicirte Verbindungsstrecke beider Punkte ansehen, und ebenso kann man als Product zweier Strecken das aus diesen Strecken (bei Beibehaltung ihrer Richtung) zu bildende Parallelogramm betrachten. Dann werden die Gravitationswirkung sowohl wie die elektrodynamische durch $\frac{ab}{r^3}$ dargestellt.

[3]) Helmholtz: Pogg. Ann. CLVIII, S. 92; Wissensch. Abh. I, S. 779.

[4]) Abhandlungen der Berliner Akademie d. Wissensch. 1845, S. 1 (gelesen am 27. Oct. 1845) und 1847, S. 1 (gelesen am 9. Aug. 1847). Auch „Vorlesungen über elektr. Ströme" von Franz Neumann, herausgeg. von van der Mühll, Leipzig 1884, S. 267 bis 295.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

diesen Erfahrungssätzen für die Grösse der von dem Strome in dem Leiterelement inducirten elektromotorischen Kraft die Formel $Eds = -\varepsilon v Cds$, wo $\varepsilon$ einen constanten Coëfficienten bedeutet. Dies ist die Fundamentalformel der Neumann'schen Theorie; aus ihr folgt für die ganze in dem Leiter inducirte elektromotorische Kraft der Ausdruck $E = -\varepsilon S Cvds$, wobei die Summation $S$ auf alle Elemente $ds$ des Leiters zu erstrecken ist. Das Product aus der Stromstärke in das Zeitelement bezeichnet Neumann als Differentialstrom mit $D$ und erhält, da $D = \frac{1}{w} Edt$ (wo $w$ den Widerstand bedeutet), aus dem Vorigen

$$D = -\frac{\varepsilon}{w} S Cvds . dt.$$

Danach kommt für die ganze Wirkung des inducirten Stromes während der Zeit von $t_0$ bis $t_1$ oder für den Integralstrom die Formel

$$J = -\frac{\varepsilon}{w} \int_{t_0}^{t_1} dt\ S\ Cv\ ds.$$

Indem dann Neumann in diesen Ausdruck für $C$ den nach dem Ampère'schen Gesetz berechneten Werth einsetzt, leitet er für $J$ einen Ausdruck ab, der für alle Fälle der Induction gilt und aus dem für alle diese Fälle die speciellen Werthe folgen, allerdings erst nach längeren und complicirten mathematischen Entwickelungen. Die erste Ableitung geschieht dabei nur für den Fall, dass die Induction durch die Bewegung des Leiters geschieht, der inducirende Strom also ruht; der entgegengesetzte Fall, wo der Leiter ruht und der Stromkreis sich bewegt, sowie die Fälle, wo sich beide bewegen, werden danach auf den ersten zurückgeführt. Der letzte Fall, wo die Induction durch Intensitätsveränderungen des inducirenden Stromes geschieht, ist schwerer und nur durch die Annahme zu bewältigen, dass die Wirkung dieselbe bleibe, ob man den inducirenden Strom in dem Stromkreise plötzlich entstehen lässt, oder ob man den Strom plötzlich aus grosser Entfernung in seine Endlage neben den Leiter bringt, oder allgemein ausgedrückt, durch die Annahme, dass eine Aenderung in der Intensität des inducirenden Stromes genau dieselbe Wirkung habe, als wenn die Entfernung jenes Stromes gegen den Leiter sich ändere. Danach zeigt sich aber noch allgemeiner, dass alle Veränderungen eines Stromes, welche inducirend auf einen Leiter wirken, ihre gleichwerthige Ursache und ihr bestimmtes Maass in der Aenderung des Potentialwerthes des inducirenden Stromes auf den Leiter zu Anfang und zu Ende der Induction haben. In der zweiten der oben angeführten Abhandlungen spricht dann Neumann dieses sein allgemeines Potentialgesetz auch mit den klaren Worten aus: „Wird ein geschlossenes,

unverzweigtes, leitendes Bogensystem $A_{I}$ durch eine beliebige Veränderung seiner Elemente, aber ohne Aufhebung der leitenden Verbindung derselben, in ein anderes $A_{II}$ von neuer Form und Lage übergeführt, und geschieht diese Veränderung von $A_{I}$ in $A_{II}$ unter dem Einfluss eines elektrischen Stromsystems $B_{I}$, welches gleichzeitig durch eine beliebige Verrückung seiner Elemente eine Veränderung in Lage, Form und Intensität von $B_{I}$ in $B_{II}$ erfährt, so ist die Summe der elektromotorischen Kräfte, welche in dem leitenden Bogensystem durch diese Veränderungen inducirt worden sind, gleich dem mit der Inductionsconstante $\varepsilon$ multiplicirten Unterschied der Potentialwerthe des Stromes $B_{II}$ in Bezug auf $A_{II}$ und des Stromes $B_{I}$ in Bezug auf $A_{I}$, wenn $A_{I}$ und $A_{II}$ von der Stromeinheit durchströmt gedacht werden."

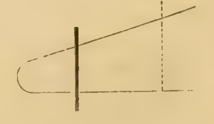
Mit diesen Resultaten Neumann's musste Weber sein Grundgesetz zuerst ins Gleichgewicht setzen. Wenn Weber's Gesetz der elementaren elektrischen Wirkungen richtig sein sollte, so mussten sich nicht bloss die Erscheinungen der Induction daraus ableiten lassen, es musste auch gezeigt werden, dass es entweder mit den von Anderen entwickelten Inductionsgesetzen übereinstimmte, oder dass diese Gesetze fehlerhaft seien. Diese Ableitung der Inductionsgesetze gab Weber gleich in seiner ersten Abhandlung, und das Gelingen dieser Ableitung durfte man immerhin als einen starken Beweis für die Richtigkeit des Gesetzes selbst ansehen. Leider zeigte sich bei der Vergleichung dieser Ergebnisse mit den Neumann'schen, dass die beiderseitigen Formeln für geschlossene Ströme zwar ganz übereinstimmten, dass sie aber für die Wirkung des Inducenten auf einen ungeschlossenen Strom widersprechende Resultate ergaben. Weber führte diesen Widerspruch auf die Thatsache zurück, dass Neumann sein Gesetz auf einen Erfahrungssatz von Lenz (den vierten der oben angegeben Sätze) basirt, während dieser Satz, weil nur aus Beobachtungen an geschlossenen Strömen abstrahirt, einer Anwendung auf ungeschlossene Ströme nicht fähig sei.

Neumann ging dann in der zweiten der oben erwähnten Abhandlungen ebenfalls auf die Vergleichung ein und fand ähnlich wie Weber, dass bei geschlossenen Strömen die Formeln übereinstimmende, für einen Inducenten mit Gleitstellen[1]) aber entgegengesetzte Resul-

[1]) Gleitstellen entstehen dadurch, dass ein Theil des Leitungskreises so beweglich gemacht wird, dass bei seiner Bewegung der Leitungskreis sich vergrössert, ohne dass die Leitung unterbrochen wird. Dies kann entweder durch Vermehrung nur der unbeweglichen Theile



oder auch durch Vermehrung der beweglichen und unbeweglichen Theile



geschehen.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

tate, entgegengesetzte Inductionsströme nämlich, ergaben und dass für diesen Fall nur seine Formel durch die Erfahrung bestätigt wurde. Doch schloss Neumann danach nicht auf eine totale Unrichtigkeit des Weber'schen Gesetzes, sondern hielt nur eine unrichtige Anwendung desselben in diesem Falle für wahrscheinlich [1]). In der That zeigte Weber bald darauf in einer weiteren Abhandlung [2]), dass man auch aus seinem Gesetz bei dem Vorhandensein von Gleitstellen einen mit der Neumann'schen Formel übereinstimmenden Werth erhalten könne, wenn man nicht nur diejenigen elektromotorischen Kräfte berücksichtige, welche durch das bewegliche Stromstück und die an der Gleitstelle neu eintretenden Elemente, sondern auch diejenigen, welche durch die Geschwindigkeitsänderung der Elektricität an den Gleitstellen hervorgerufen werden. Neumann bekannte danach bereitwillig, dass es „Weber wirklich gelungen, die Schwierigkeit in sehr glücklicher Weise zu lösen“, und sprach sich überhaupt über das Gesetz selbst in sehr günstiger Weise aus. „Der Erfolg“, sagt er, „ist sehr glänzend. Einmal folgt aus dem Gesetz sehr einfach das Ampère'sche Gesetz für die Wirkung zweier Stromelemente, dann aber auch das allgemeine Inductionsgesetz, wie wir dasselbe aufgestellt haben“ [3]). Weber's Gesetz wurde danach von den meisten Physikern anerkannt und in den Lehrbüchern einzig oder doch vorzugsweise zur mathematischen Ableitung der Gesetze der Induction benutzt. Erst im nächsten Zeitraume, in den sechziger und noch mehr in den siebziger Jahren, erhob man gegen die fundamentalen Voraussetzungen und damit gegen die Geltung desselben überhaupt mannigfache und heftige Einwände, auf die wir später zurückkommen werden.

Für die quantitative Bestimmung der elektrodynamischen Wirkungen und für die Verification der aufgestellten elektrodynamischen Gesetze waren bis dahin die Ampère'schen Drahtrechtecke die einzigen, wenig genauen Instrumente gewesen. W. Weber gab auch diesem Theile der physikalischen Messkunst eine bessere Grundlage, indem er das Bifilarmagnetometer in ein Elektrodynamometer umwandelte, das genügend feine und doch sichere Messungen erlaubte [4]). Der Apparat bestand der Hauptsache nach aus zwei, auf cylindrische Rahmen aufgerollten Multiplicatorrollen, von denen die eine so weit war, dass die andere bequem darin Platz finden und frei sich bewegen konnte. Die bewegliche Rolle wurde an zwei Silberfäden, die zur Zu- und Ableitung des Stromes dienten und welche der Rolle zugleich ein bestimmtes Drehungsmoment sicherten, bifilar aufgehangen. Zur genauen Beobachtung der Ablenkung dieser Rolle war dieselbe mit einem Spiegelchen fest

---

[1]) Vorlesungen über elektrische Ströme, Leipzig 1884, S. 305.

[2]) Abhandl. d. K. Sächs. Gesell. d. Wissensch., I, Leipzig 1852.

[3]) Vorlesungen über elektr. Ströme, S. 305 und 296.

[4]) Abhandl. bei Begründung der K. Sächs. Gesellsch. 1846, S. 211.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

verbunden; die Anfangslage wurde so gewählt, dass die Ebenen der Windungen in beiden Multiplicatorrollen senkrecht auf einander standen. Damit vermochte dann Weber nicht bloss Ampère's elektrodynamisches Grundgesetz, das ja auch seinem Gesetze noch als Fundament diente, aufs Neue vollständig zu bestätigen, sondern konnte auch alle entwickelten Gesetze der Induction auf ihre Wahrheit und Genauigkeit mit voller Sicherheit prüfen.

Ebenso wichtig aber, wie die Construction dieses Messapparates sowohl für die Wissenschaft als für die Technik wurde, ebenso folgenreich war auch die Einführung des absoluten Maasssystems in die Elektricitätslehre. Der Techniker erlangte erst dadurch das Mittel, die erzeugten elektrischen Kräfte mit den aufgewandten mechanischen zu vergleichen, und gewann erst dadurch eine richtige Werthschätzung der ersteren; die Wissenschaft aber erhielt in der Möglichkeit der Zurückführung aller Naturwirkungen auf die drei mechanischen Einheiten des Raumes, der Zeit und der Masse einen neuen Beweis für die innere Einheit und die mechanische Natur aller Naturkräfte. Freilich war diese Zurückführung gerade für die elektrischen Kräfte keine leichte Aufgabe. Der in der Elektricitätslehre nicht zu entbehrende Begriff der elektrischen Masse passte in keiner Weise in den Kreis der mechanischen Vorstellungen und konnte nur indirect durch den im absoluten Maasse schon definirten Begriff der Krafteinheit auf absolutes Maass bezogen und dadurch im Grunde genommen aus den mathematischen Entwickelungen eliminirt werden.

Als Einheit der Masse hatte schon Gauss für den Magnetismus und damit auch für die statische Elektricität diejenige Masse festgesetzt, welche auf eine gleiche Masse in der Einheit der Entfernung die Einheit der Kraft ausübt. Für die Stromintensität reichte diese Bestimmung nicht aus, weil hier ein neues Element, die Geschwindigkeit, wirkend eintritt. Da indessen im absoluten Maasssysteme die Einheit der Geschwindigkeit als eine abgeleitete definirt wird, so liess sich danach leicht auch die Intensität des galvanischen Stromes auf absolute Einheiten zurückführen. Als Einheit der Stromintensität musste dann die Intensität des Stromes definirt werden, „welcher entsteht, wenn in der Zeiteinheit die Einheit der freien positiven Elektricität in der einen Richtung und eine gleiche Menge negativer Elektricität in der entgegengesetzten Richtung durch jeden Querschnitt der Kette fliesst“ [1]). Diese Stromeinheit bezeichnete W. Weber als die mechanische, indem er ausdrücklich daran erinnerte, dass die absoluten Maasseinheiten in der Vorstellung alle Kräfte auf mechanische (d. h. auf bewegende) zurückführen. Er bemerkte aber dabei sogleich, dass in diesem Maasse die Messung der Stromintensität

[1]) Pogg. Ann. XCIX, S. 11, 1855.

nicht direct auszuführen sei, weil wir weder die Menge des neutralen elektrischen Fluidums, welche in der Cubikeinheit des Leiters vorhanden ist, noch die Geschwindigkeit kennen, mit welcher sich die Elektricitäten beider Ströme verschieben. Nicht direct durch die Elektricitätsmengen, sondern nur durch deren Kraftwirkungen kann die Stromintensität gemessen werden, und aus diesen Wirkungen haben sich drei relative Maasssysteme für die Stromintensität ergeben. Nach der chemischen Wirkung bezeichnet man als elektrolytische Einheit der Stromintensität diejenige, welche in der Zeiteinheit die Masseneinheit von Wasser in ihre chemischen Bestandtheile zerlegt. Nach der magnetischen Wirkung wird als die magnetische Einheit der Stromintensität die Intensität des Stromes definirt, der, wenn er eine Ebene von der Grösse der Flächeneinheit umläuft, in der Ferne überall die Wirkungen eines in dem Mittelpunkte jener Ebene befindlichen Magneten ausübt, welcher die Einheit des Magnetismus besitzt und dessen magnetische Achse auf der Ebene senkrecht steht (d. i. die Intensität des Stromes, der in einer Tangentenboussole mit einfachem Ringe vom Radius $R$ die Nadel um einen Winkel $\varphi = arc\, tg\, \frac{2\pi}{TR}$ ablenkt, wo $T$ die horizontale Intensität des Erdmagnetismus bezeichnet). Nach den elektrodynamischen Wirkungen des Stromes endlich erklärt man als die elektrodynamische Einheit der Stromstärke diejenige, welche in zwei parallelen, auf ihrer Verbindungslinie senkrecht stehenden Stromelementen statthat, wenn dieselben in der Entfernung 1 eine Wirkung auf einander ausüben, die sich zur Krafteinheit verhält, wie das Product $ds\, ds'$ zur Flächeneinheit.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

Alle diese Einheiten hatte Weber schon in seinen beiden ersten Abhandlungen über elektrodynamische Maassbestimmungen angegeben und auch die Verhältnisse der letzten drei Einheiten festgesetzt [1]); es hatte sich da gefunden, dass die magnetische Einheit $\sqrt{2}$ mal grösser als die elektrodynamische und $106^2/_3$ mal kleiner als die elektrolytische ist. In einer Abhandlung vom Jahre 1856 [2]) ging er dann dazu über, das Verhältniss dieser Einheiten zur mechanischen Einheit der Stromintensität festzustellen und damit erst die Zurückführung der Stromintensität auf absolutes Maass zu vollenden. Weber wählte zur directen Vergleichung mit der mechanischen die magnetische Stromeinheit. Danach lautete die Aufgabe: Wenn ein constanter Strom gegeben ist, durch welchen die Nadel einer Tangentenboussole mit einfachem Multiplicatorkreise eine Ablenkung um einen

---

[1]) Abhandl. bei Begründung der K. S. Gesellschaft der Wissensch. 1846; Abhandl. der K. S. Gesellsch. d. Wissensch. I, 1852.

[2]) Elektrodynamische Maassbestimmungen, insbesondere Zurückführung auf mechanisches Maass von W. Weber und R. Kohlrausch, Abhandl. der K. S. Gesellschaft V, S. 219. 1857; auch im Auszuge Pogg. Ann. XCIX, S. 10.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

Winkel $\varphi = arc\ tg\ \frac{2\pi}{RT}$ erfährt, so soll bestimmt werden, wie die Elektricitätsmenge, welche bei einem solchen Strome in einer Secunde durch den Querschnitt des Leiters fliesst, sich verhält zu der Elektricitätsmenge auf jeder von zwei gleichgeladenen, (unendlich) kleinen Kugeln, welche einander aus der Entfernung von 1 mm mit der Einheit der Kraft abstossen. Nun hängt die Grösse des ersten Ausschlages der Nadel eines Multiplicators, durch welchen die freie Elektricitätsmenge $E$ eines isolirten Leiters nach der Erde abgeleitet wird, nur von der Menge der Elektricität, nicht von der Entladungszeit ab, und dasselbe kann man auch für die Ablenkung durch einen nur kurze Zeit andauernden, constanten Strom annehmen. Dabei muss noch ausdrücklich bemerkt werden, dass bei gleichem Ausschlage durch einen Entladungsschlag und einen constanten Strom die in dem letzteren während der Wirkungszeit durch einen Querschnitt des Leiters gehende Elektricität einer Art nur die Hälfte von derjenigen sein kann, die in dem ersteren zur Entladung kommt, weil in dem Strome zwei entgegengesetzte Elektricitäten dieselbe Wirkung erzeugen. Beobachtet man also die bei der Entladung einer gemessenen Menge statischer Elektricität $E$ eintretende Elongation der Magnetnadel und misst die kleine Zeit $\tau$, während welcher ein constanter Strom von der (magnetischen) Intensität 1 in derselben Tangentenboussole dieselbe Ablenkung erzeugt, so weiss man, dass durch einen Querschnitt des Leitungsdrahtes während dieser Zeit die Elektricitätsmenge $\frac{E}{2}$ und während der Zeiteinheit also die Elektricitätsmenge $\frac{E}{2\tau}$ fliesst; diese Zahl giebt danach die Menge derjenigen mechanischen Einheiten der Stromintensität an, welche einer magnetischen Einheit der Intensität gleich ist. In sehr sorgfältigen, aber, wie in der Natur der Sache liegt, immer sehr von einander abweichenden Versuchsreihen fanden Weber und Kohlrausch für diese Grösse die folgenden Zahlen:

| Nummer der Versuchsreihe | $\frac{E}{2\tau}$ |
|---|---|
| 1. | 151 000 . $10^6$ |
| 2. | 161 300 . $10^6$ |
| 3. | 158 500 . $10^6$ |
| 4. | 149 800 . $10^6$ |
| 5. | 156 250 . $10^6$ |

Die mechanische Einheit verhält sich also
zur magnetischen im Mittel wie . . . 1 : 155 370 . $10^6$,
und nach dem Vorigen
zur elektrodynamischen wie . . . 1 : 109 860 . $10^6$,
und zur elektrolytischen wie . . . 1 : 16 573 . $10^6$.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

Dieses Resultat wandte Weber vor Allem dazu an, um die in seinem elektrodynamischen Grundgesetze

$$W = \frac{ee'}{rr}\left[1 - \frac{1}{c^2}\left(\left[\frac{dr}{dt}\right]^2 - 2r\frac{d^2r}{dt^2}\right)\right]$$

vorkommende Constante $c$ zu bestimmen. In seiner zweiten Abhandlung über elektrodynamische Maassbestimmungen hatte er bewiesen, dass jene Constante zu 4 sich verhält, wie die elektrodynamische Maasseinheit zur mechanischen; aus dem nun festgesetzten Verhältniss der beiden Einheiten erhielt er danach für $c$ den Werth $439\,440 \,.\, 10^6$ mm oder 59 320 Meilen. Wie aus der Formel leicht zu ersehen, stellt diese Zahl die constante, relative Geschwindigkeit dar, bei der die elektrischen Massen gar nicht mehr auf einander wirken. Weber macht danach ausdrücklich darauf aufmerksam, dass bei dieser Grösse der Constanten $c$ der elektrodynamische Theil

$$\frac{ee'}{rr} \cdot \frac{1}{c^2}\left(\left[\frac{dr}{dt}\right]^2 - 2r\frac{d^2r}{dt^2}\right)$$

der Wirkung zweier Elektricitätstheilchen gegen den statischen $\frac{ee'}{rr}$ immer verschwinden muss, wenn nicht, wie beim galvanischen Strome, die elektrostatischen Kräfte durch Neutralisation der positiven und negativen Elektricitäten sich aufheben.

Die Abhandlung Weber's vom Jahre 1856 war der Schlussact bei der Einführung des absoluten Maasssystems in die Lehre von der Elektricität. In relativem Maasse hatte Weber auch die Einheiten der elektromotorischen Kraft und des Widerstandes noch in der Arbeit von 1852 [1]) bestimmt; mit Hülfe des mechanischen Maasses der Stromstärke konnte er nun jene Einheiten ebenfalls auf mechanisches Maass reduciren. Mit Hülfe des absoluten Maasses des Magnetismus definirte Weber als absolute Einheit der elektromotorischen Kraft diejenige, welche durch die Einheit der magnetischen Kraft in einem Leiterkreise vom Flächeninhalt 1 inducirt wird, wenn dieser Kreis aus einer der Richtung der magnetischen Kraft parallelen Lage in eine zu derselben senkrechte in Zeit von einer Secunde gedreht wird. Nach dieser Definition konnte die Einheit der elektromotorischen Kraft direct gemessen werden; als inducirenden Magnetismus gebrauchte Weber bei seinen Messungen den Erdmagnetismus und als Inductionsapparat construirte er für diese Zwecke den Erdinductor.

Nach Zurückführung der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke auf absolutes Maass aber konnte man leicht nun auch den Widerstand mit Hülfe der aus dem Ohm'schen Gesetze folgenden

---

[1]) Elektrodynamische Maassbestimmungen, insbesondere Widerstandsmessungen, Abhandl. der K. S. Gesellsch. I, S. 197, 1852; Pogg. Ann. LXXXII, S. 337.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

Formel $W = \frac{E}{J}$ in absolutem Maasse ohne Weiteres berechnen. Als absolute Einheit desselben war danach derjenige Widerstand anzusehen, welcher in einem Leiterkreise bei der elektromotorischen Krafteinheit die Einheit der Stromintensität entstehen liess. Diese Widerstandsmessungen wurden für die Folge noch besonders wichtig, nicht bloss wegen ihrer directen Verwendung bei vielen theoretischen und praktischen Problemen, sondern auch indirect für die Bestimmung der elektromotorischen Kraft. Nach der gewählten Einheit der letzteren konnte die Messung derselben nur für Inductionsstösse, die durch mechanische Kraft erzeugt waren, direct erfolgen, auf alle anderen Fälle der Erzeugung elektromotorischer Kräfte war jene Definition der Einheit nicht ohne Weiteres anwendbar. Für die Bestimmung der Widerstände in absolutem Maasse dagegen bedurfte man nur der Messung eines bekannten Widerstandes in diesem Maasse, um durch Vergleichung mit diesem alle anderen Widerstände auf absolutes Maass zurückzuführen. War also ein Normalwiderstand einmal in absolutem Maasse bekannt, so konnte man in jedem speciellen Falle den stattfindenden Widerstand durch jenen Normalwiderstand messen und konnte dann die Ohm'sche Formel $E = J \,.\, W$ zur Berechnung der unbekannten elektromotorischen Kraft in absolutem Maasse anwenden. Die genaueste Bestimmung eines Normalwiderstandes oder einer allgemein anerkannten Widerstandseinheit wurde damit zu einem Fundamentalproblem der messenden Elektricitätslehre.

Die von Weber vorgeschlagene absolute Einheit des Widerstandes entsprach in ihrem Begriffe einer Geschwindigkeit und war von gleicher Dimension mit dieser; nach den gewählten absoluten Einheiten der Länge und der Zeit wurde sie mit $\frac{\text{mm}}{\text{Secunde}}$ [1] bezeichnet. Die Methoden zur Zurückführung beliebiger Widerstände auf diese Einheit gab er ausführlich in der erwähnten Abhandlung von 1852 und führte da auch solche Zurückführungen beispielsweise aus. Jacobi hatte 1846 an die Physiker einen Kupferdraht von $7619\,^3/_4$ mm Länge, $^2/_3$ mm Durchmesser und $22\,449\,^3/_{10}$ mg Gewicht versandt und denselben als Normalwiderstandseinheit vorgeschlagen [2]. Weber bestimmte denselben nun in absolutem Maasse zu $598 \,.\, 10^7 \frac{\text{mm}}{\text{Secunde}}$ [3]. Dieser Etalon wurde dann auch längere Zeit gebraucht, doch zeigte sich nach und nach, dass sein Widerstand keineswegs unveränderlich und derselbe als Normalmaass also unbrauchbar sei. W. Siemens schlug

---

[1] Weber nahm wie Gauss als absolute Einheiten der Länge, der Zeit und der Masse das Millimeter, die Secunde und das Milligramm an. S. Seite 302 d. B.

[2] Compt. rend. XXXIII, p. 277.

[3] Pogg. Ann. LXXXII, S. 358.

darum 1860 [1]) vor, den Widerstand eines Quecksilberprismas von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt bei 0° als Einheit zu betrachten. Weber prüfte in einer Arbeit von 1861 [2]) auch diese Einheit und fand sie gleich

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

$10257000 \frac{\text{m}}{\text{Sec.}}$. Endlich trat 1861 die Angelegenheit noch in ein neues Stadium dadurch, dass die British Association und die Royal Society in London eine besondere Commission mit W. Thomson an der Spitze zur Bearbeitung dieser Frage niedersetzten. Diese Commission empfahl im Princip die Weber'sche absolute Einheit des Widerstandes zur Annahme, die nur der bequemeren Handhabung wegen in einem bestimmten Verhältnisse, nämlich $10^7$ mal, vergrössert werden sollte [3]). Die Arbeiten für und die Verhandlungen über diesen Vorschlag aber zogen sich so in die Länge, dass erst zwanzig Jahre später der Elektrikercongress in Paris im Jahre 1881 eine allgemeine Uebereinstimmung und damit einen Abschluss der Debatten zu Stande brachte. Auch der Congress schloss sich an das absolute Maasssystem Weber's an, nur wählte man Centimeter, Secunde und Gramm, statt Millimeter, Secunde und Milligramm als primitive, absolute Einheiten und nahm als absolute Widerstandseinheit das $10^9$ fache der so bestimmten Einheit $\frac{\text{cm}}{\text{Sec.}}$ an. Um dabei auch in den Einheiten das Ohm'sche Gesetz zu wahren, musste man dann als Einheit der elektromotorischen Kraft das $10^8$ fache und als Einheit der Intensität den zehnten Theil der nach Weber'scher Art bestimmten Einheiten festsetzen. Die so bestimmten Einheiten, denen man noch Einheiten der elektrischen Quantität und der Capacität zufügte, nannte man honoris causa Ohm, Volt, Ampère, Coulomb und Farad. Leider blieb dabei aus einem rein äusserlichen Grunde, weil man nämlich eine anders angenommene Einheit früher mit dem Namen „Weber" bezeichnet hatte, der Name des eigentlichen Begründers des ganzen Maasssystems unverherrlicht [4]).

---

[1]) Pogg. Ann. CX, S. 1.

[2]) Abhandl. der K. Gesellschaft der Wissensch. zu Göttingen X, S. 1, 1862.

[3]) F. Kohlrausch machte 1870 (Pogg. Ann., Erg. VI, S. 1, 1874) im Laboratorium von W. Weber eine neue Bestimmung der vorgeschlagenen Einheiten in absolutem Maasse. Er fand die Siemens'sche Einheit gleich $9\,717\,000\,000 \frac{\text{mm}}{\text{Sec.}}$ oder gleich $0{,}9717 \frac{\text{Erdquadrant}}{\text{Sec.}}$. Die Einheit der British Association war 1864 auf 1,0493 Siemenseinheiten bestimmt worden, sie erschien danach gleich $1{,}0196 \frac{\text{Erdquadr.}}{\text{Sec.}}$, also um circa 2 Proc. grösser als beabsichtigt. Kohlrausch hielt für möglich, dass bei den Messungen der British Association inducirte Ströme in dem aus starkem Messing bestehenden Stativ, in welchem der Multiplicatorrahmen rotirte, das Resultat beeinträchtigt hätten.

[4]) Fleeming Jenkin macht (Pogg. Ann. CXXVI, S. 369) folgende Angaben über die Entwickelung der Widerstandsmessungen: Davy bewies 1821

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

Einiger vereinzelter, mit dem Gange der wissenschaftlichen Entwickelung weniger zusammenhängenden Erscheinungen aus diesem Zeitraume müssen wir noch gedenken. Walker[1]), Mitchel[2]) und Gould[3]) bestimmten um das Jahr 1848, jeder für sich, die Geschwindigkeit der Elektricität in Telegraphendrähten und fanden für dieselbe sehr verschiedene, jedenfalls aber bedeutend geringere Werthe als Wheatstone, nämlich nur resp. 25000, 45000 und 25000 km in der Secunde. Fizeau und Gounelle[4]) dagegen erhielten auf Telegraphenleitungen zwischen Paris und Rouen wieder erheblich grössere Zahlen, nämlich in einem Eisendraht von 4 mm Durchmesser 101 710 km und in einem Kupferdraht von 2,5 mm Durchmesser 177 722 km. Fizeau[5]) wollte die grossen Abweichungen nur aus den vielen Fehlerquellen bei den Messungen ableiten; J. M. Gaugain[6]) aber behauptete, dass die Fortpflanzungsdauer der Elektricität in der That nicht constant, sondern von sehr verschiedenen Umständen abhängig sei und gleich $\frac{Cl^2}{kw}$ gesetzt werden könne; wo $C$ einen Ladungscoëfficienten, $l$ die Länge der Leitung, $k$ die Leitungsfähigkeit und $w$ den

(Phil. Trans. 1821, p. 425), dass die Leitungsfähigkeit der Metalle verschieden und auch mit der Temperatur veränderlich sei; Cumming, Snow Harris und A. C. Becquerel veröffentlichten Anfangs der zwanziger Jahre Untersuchungen über die Leitungsfähigkeit. Den reciproken Begriff Widerstand führte Ohm 1827 ein, den von ihm angewandten Begriff der „reducirten Länge" hat man lange Zeit bei Widerstandsmessungen gebraucht. Lenz nahm 1838 (Pogg. Ann. XLV, S. 105) einen Kupferdraht (Nr. 11) von 1 Fuss Länge für sich als Normalwiderstand an und gab an, dass derselbe 19,9 grösser sei, als der schon 1833 (Pogg. Ann. XXXIV, S. 418) von ihm benutzte. Wheatstone schlug 1843 (Phil. Trans. 1843, p. 303) einen Kupferdraht von 1 Fuss Länge und 100 Gran Gewicht als Normaletalon für die Allgemeinheit vor. Hankel gebrauchte 1846 (Pogg. Ann. LXIX, S. 255) einen Eisendraht als Normalwiderstand. J. B. Cooke sprach 1847 (Phil. Mag. (3) XXX, p. 385) von einem Drahte, der sich nach Dimensionen und Leitungsfähigkeit als Normalwiderstand eigne. Buff (Pogg. Ann. LXXIII, S. 497) und Horsford (Silliman's Journal V, p. 86) gebrauchten 1847 und 1848 Neusilberdrähte als solchen, bis Jacobi's Etalon 1848 zur allgemeinen Einführung gelangte. Von 1850 an drängte auch das Interesse der unterirdischen und unterseeischen Telegraphenlinien zu genauen Widerstandsmessungen, mit Hülfe deren man den Ort der Schadhaftigkeit eines Drahtes aus der Entfernung bestimmen konnte. Schon seit 1847 bediente man sich in England zu dem Zwecke der von F. W. Cooke verfertigten Widerstandsrollen, die wohl auf Wheatstone's Einheiten beruhten. C. F. Varley gab um jene Zeit eine rohe Methode zur Aufsuchung der Fehler durch Widerstandsmessungen an; W. Siemens beschrieb eine solche Methode genauer (Pogg. Ann. LXXIX, S. 481), und Sir Charles Bright erhielt 1852 ein Patent auf solche Bestimmungen.

1) Silliman's Journ. VIII, p. 142, 1849.

2) Pogg. Ann. LXXX, S. 161.

3) Ibid. Erg. III, S. 374.

4) Compt. rend. XXX, p. 437; Pogg. Ann. LXXX, S. 158.

5) Compt. rend. XXXII, p. 47.

6) Ibid. L, p. 395.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

Querschnitt der Leitung bedeuten. Zu ganz ähnlichen Ergebnissen ist dann in neuester Zeit auch Hagenbach[1]) gekommen. Er machte darauf aufmerksam, dass man bei allen solchen Messungen nicht die Geschwindigkeit einer stationären Strömung, sondern nur eine Ladungsgeschwindigkeit beobachtet, und fand dann durch eigene Versuche, dass die Ladungszeit zwar von der absoluten Grösse des Potentials der Ladung unabhängig ist, für verschiedene Drähte mit gleichen relativen Grenzbedingungen aber proportional mit dem Quadrat der Drahtlänge, der Einheitscapacität und dem Einheitswiderstande sich ändert und dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektricität also im quadratischen Verhältniss mit wachsender Drahtlänge abnimmt. Mit dieser Anschauung stimmte denn auch das Zusammentreffen der geringen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Elektricität in unterseeischen Kabeln, die z. B. zwischen London und Brüssel nur auf 4300 km gemessen wurde, mit den starken Ladungserscheinungen derselben, die von Wheatstone, Faraday und Siemens vielfach beobachtet und constatirt wurden. Faraday's schon früher erwähnte Untersuchungen[2]) über die Entladungserscheinungen der Elektricitäten und deren beobachtete Abhängigkeit von dem Medium, in dem sie stattfanden, lenkte das Interesse der Physiker auch auf das Leitungsvermögen der Luftarten und den Durchgang der Elektricität durch den leeren Raum. A. Masson[3]) gelang es im Jahre 1853, den Strom eines starken Ruhmkorff's durch die Torricelli'sche Leere zu führen, dieselbe füllte sich dabei mit bleichem, phosphorescirendem Lichte. Indessen bemerkte man dazu sogleich, dass diese Leere doch nicht absolut luftleer sei, und beobachtete, dass auch hier die Entladungserscheinungen durch die sehr verdünnten Reste von Luft und Quecksilberdampf stark beeinflusst würden. J. P. Gassiot[4]) construirte danach zur Beobachtung dieser merkwürdigen Phänomene die bis auf wenige Millimeter Druck ausgepumpten Glasröhren, welche auch mit geringen, ganz verdünnten Mengen anderer Gase angefüllt werden konnten und die Geissler in Bonn einige Jahre später in so grosser Vollkommenheit und Verschiedenheit herstellte, dass man sie fortan mit seinem Namen benannte[5]). Diese Apparate erweckten grosses Interesse in allen Kreisen und veranlassten in den nächsten Jahren bis in den Anfang der sechziger

[1]) Verhandl. der naturf. Gesellschaft in Basel VIII, S. 165, 1886.

[2]) S. d. Bd., S. 294.

[3]) Compt. rend. XXXVI, p. 258. — A. Ph. Masson, 1806—1860, Prof. in Paris.

[4]) Rep. of the Brit. Ass. 1854, Trans. of the sect., p. 68.

[5]) Plücker, der (Pogg. Ann. CIII, S. 88, 1858) den Vorschlag zu dieser Benennung machte, sagte dazu: „Ich gebe ihnen und gewiss mit Recht diesen Namen, obgleich die ersten Röhren nicht von ihm selbst verfertigt worden sind." — Heinrich Geissler (1814—1879), Glasbläser aus Igelshieb in Thü-

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

Jahre viele Abhandlungen über die elektrische Entladung im luftverdünnten Raume. Doch entsprachen dieselben damals wenigstens noch nicht ganz den an sie gestellten Erwartungen und erwiesen sich mehr als interessante Schauapparate, denn als wissenschaftlich nützlich, mehr geeignet, der Wissenschaft Freunde als Forscher zuzuführen. Ausser dem von Faraday beobachteten Glimmlicht der Kathode, dem von der Anode ausgehenden Schichtenlicht, durch das man vergeblich auf Beweise für Wellenbewegungen oder wenigstens Interferenzen der Elektricitäten zu kommen hoffte, ausser der schon lange bekannten Einwirkung des Magneten auf das Licht war nichts Besonderes von ihnen herauszubringen, und erst im nächsten Zeitraume, in den letzten Jahren besonders, erwiesen sie sich wissenschaftlich fruchtbar. Zur Anstellung der letzterwähnten Entladungsversuche konnten des grossen Widerstandes in den Röhren wegen nur Entladungsfunken von Leydener Flaschen oder hochgespannte Inductionsströme gebraucht werden. Die letzteren waren nach der Erfindung des Wagner'schen Hammers weitaus die bequemsten, und handliche Inductionsapparate waren schon lange vorhanden. Schon vor 1849 hatte E. du Bois-Reymond[1]) den bekannten Schlittenapparat construirt, der in der ursprünglichen Form noch heute gebraucht wird. Seine grossen Inductionsapparate aber begann Ruhmkorff seit dem Jahre 1850 herzustellen; 1864 erhielt er dafür den Napoleon'schen Preis von 50000 Frcs.

Auf die Theorie der natürlichen Entladungen der atmosphärischen Elektricität, der Blitze, hatten diese Untersuchungen nur wenig Einfluss, und die von Arago angegebenen Formen derselben, die Linien-, Flächen- und Kugelblitze, blieben noch ebenso unerklärt wie früher. Th. du Moncel[2]) versuchte in seiner Théorie des éclairs für die letzteren ein Analogon bei der künstlichen Entladung aufzuzeigen. Die Länge der Blitze, wie auch ihre Abweichung von der geraden Linie, rührt nach ihm von dem Regen und den verdichteten Wasserdämpfen her, die denselben als secundäre Leiter dienen. Wenn man eine gefirnisste Ebene mit einer dünnen Wasserschicht überzieht, so geht der Funken eines Ruhmkorff mit leuchtender Farbe hindurch, die von der Dicke der Wasserschicht abhängt. Oefter aber endet der Funken, wenn die Wasserschicht dicker wird, in einer rothen Kugel; diese entspricht den Kugelblitzen. Im Jahre 1859 gab Tessan[3])

---

ringen, zuletzt Inhaber einer Werkstätte für chemische und physikalische Apparate in Bonn.

[1]) Seine Epoche machenden Arbeiten über physiologische Elektricität, auf die wir hier nicht eingehen können, veröffentlichte Du Bois-Reymond 1843 in einer Dissertation, von 1845 an in den „Fortschritten der Physik" und seit 1848 in dem Hauptwerke „Untersuchungen über die thierische Elektricität", 2 Bde., Berlin 1848 und 1849. — Emil Heinr. du B.-R., geb. am 7. November 1818 in Berlin, Prof. der Physiol. daselbst.

[2]) L'Inst. 1854, p. 47.

[3]) Compt. rend. XLIX, p. 189.

auch eine Ableitung der Kugelblitze, die aber doch nicht viel Wahrscheinliches an sich hatte. Jeder Kugelblitz ist danach als eine Leydener Flasche anzusehen. Die isolirende Masse derselben wird von einer kugelförmigen Luftschicht gebildet, welche durch die Anziehung der Elektricität auf der äusseren und inneren Fläche zusammengedrängt wird. Durch das fortdauernde Ausströmen von Elektricität aus ihrer Oberfläche wird die Kugel leuchtend, und je nach der Comprimirung der Luft in ihrem Inneren sinkt oder steigt sie verhältnissmässig langsam in der Atmosphäre.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

Mit der Beobachtung der Gewitterelektricität, wie der atmosphärischen Elektricität überhaupt, beschäftigten sich immer mehr Beobachter. G. Schübler[1]) hatte noch in der vorigen Periode sowohl eine tägliche als eine jährliche Periode der normalen atmosphärischen Elektricität, sowie die Abhängigkeit der Gewitterelektricität von der Windrichtung constatirt. Dellmann verbesserte die Beobachtungsapparate und constatirte die Veränderungen mit den verbesserten Apparaten immer genauer. Dabei aber kam man in der Theorie der atmosphärischen Elektricität doch nicht weiter, und der Ursprung derselben blieb, trotzdem an zuversichtlichen Behauptungen über ihn kein Mangel war, doch unaufgeklärt. Seit Anfang des Jahrhunderts hatte man mit de Saussure und Volta die Quelle der Luftelektricität in dem Verdampfungsprocess des Wassers gesucht, das zurückbleibende Wasser für negativ, den Dampf desselben aber für positiv elektrisch erklärt. Pouillet[2]) schränkte diese Ansichten ein, indem er behauptete, dass reines Wasser beim Verdampfen keine Elektricität entwickelt und dass nur, wenn das Wasser Salze oder Säuren enthält, das zurückbleibende Wasser negativ, wenn es aber Alkalien enthält, positiv wird. Peltier widersprach auch dem und erklärte, dass nur bei heftigem, stossweisem Verdampfen des Wassers, am Ende des Leidenfrost'schen Versuches, Elektricität entstehen könne. F. Reich[3]) fand das ebenso unrichtig, weder beim Verdampfen noch beim Condensiren von Wasser entstehe jemals Elektricität ohne weitere Ursachen. P. Riess endlich erklärte 1846 glatt heraus: „Die Ursache der Luftelektricität ist noch unerwiesen;“ wenn man beim Verdampfen des Wassers Elektricität bemerkt, da rührt sie nur von der Reibung der Wassertheilchen an den Wänden der einschliessenden Gefässe her[4]). Becquerel[5]) versuchte dann das Problem von einem höheren Standpunkte zu fassen und machte darauf aufmerksam, dass das elektrische Gleichgewicht bei allen molecularen Veränderungen der

---

[1]) Grundsätze der Meteorologie, Leipzig 1831. — Schübler, 1787—1834, Prof. der Bot. in Tübingen.

[2]) Ann. de chim. et de phys. (2) XXXV, p. 401, 1827.

[3]) Abhandl. bei Begründung der K. S. Gesellsch. 1846, p. 197.

[4]) Pogg. Ann. LXIX, S. 286, 1846.

[5]) Compt. rend. XLIII, p. 1101, 1856.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

Stoffe gestört werde und so die Luftelektricität aus sehr verschiedenen Quellen herrühren könnte. Als solche Quellen der Luftelektricität gab er an: 1) die Ausströmung von Sauerstoff und Kohlensäure aus Pflanzenblättern; 2) die Berührung des Landes und des Wassers; 3) die Zersetzung organischer Stoffe; 4) die Berührung kalter und warmer Gewässer. Daher erkläre sich die Seltenheit der Gewitter in der Polarzone, auf dem Meere und dem Inneren von Continenten. Indessen machte schon der Berichterstatter in den Fortschritten der Physik darauf aufmerksam, dass auf diese Weise vielleicht die Luftelektricität, aber doch nicht die plötzlich auftretende und so stark von den Winden abhängige Gewitterelektricität zu erklären sei.

Ein ähnliches Schicksal wie die atmosphärische Elektricität erfuhr der Erdmagnetismus. Früher hatte man den Magnetismus der Erde als einen natürlichen Zustand derselben hingenommen, der keiner weiteren Begründung bedürfe. Nachdem aber die Beobachtungen des magnetischen Vereins, die genauen Messungen der magnetischen Constanten zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Orten sowohl periodische wie unperiodische Aenderungen dieses Zustandes unwiderleglich gezeigt, danach musste man auch den Magnetismus der Erde auf weiter zurückliegende, veränderliche Ursachen zurückzuführen und mit anderen Kräften mehr als es bisher geschehen in Verbindung zu setzen versuchen. Dafür lag nichts näher, als den Erdmagnetismus, wie jeden anderen Magnetismus, durch elektrische Ströme zu erklären, und solche waren ja auch aus den Temperaturdifferenzen der Erde gleich nach der Entdeckung der Thermoelektricität abgeleitet worden. Jetzt schien es mit Hülfe der überall sich ausspannenden Telegraphendrähte leicht, diese Ströme auch direct zu beobachten. In der That konnte auch W. H. Barlow[1]) übereinstimmend mit anderen Physikern durch Versuche auf nicht gebrauchten Telegraphenlinien constatiren, dass Drähte, die an beiden Enden mit der Erde in Verbindung gesetzt sind, immer von elektrischen Strömen durchflossen werden, Strömen, die an beiden Stationen gleichzeitig und in gleicher Masse auftreten, die nicht aus der Atmosphäre, sondern nur aus der Erde stammen und deren Intensität sowohl regelmässig als auch unregelmässig wechselt. — Indessen hätte man auch für diese Ströme erst noch die näheren Ursachen suchen müssen, und so interessirte man sich noch immer mehr für die genaue Erkundung des thatsächlichen erdmagnetischen Zustandes der Erde, als für die Ursache desselben. Hansteen versuchte 1855[2]) noch einmal, gegenüber der von Gauss gegebenen Vertheilung des Magnetismus auf der Erde, seine schon früher aufgestellte Hypothese der vier magnetischen Erdpole durchzusetzen, doch wieder ohne Erfolg. Lamont schloss

1) Phil. Trans. 1849, p. 61.

2) Astronomische Nachrichten XL, p. 169 u. f., 1855. — Christopher Hansteen (1784—1873), Director der Sternwarte in Christiania.

Elektricitätstheorien. c. 1840 bis c. 1860.

1851 [1]) aus den Münchener Beobachtungen auf eine ca. 10,3 jährige *Periode der magnetischen Declinationsbewegungen*. R. Wolf [2]) bemerkte 1852 dem entgegen, dass die Periode der magnetischen Variationen genau mit der Periode der *Sonnenflecken* stimme, dass diese Periode aber 11,1 Jahre betrage. Einige andere Physiker behaupteten dann wieder einen *Einfluss des Mondes* auf die Constanten des Erdmagnetismus, und auch diese Beobachtungen wurden mehrfach bestätigt. Wenigstens schien aus diesen Behauptungen das Dasein eines Einflusses der Sonne, des Mondes und vielleicht auch der anderen Gestirne auf die magnetischen Verhältnisse unserer Erde hervorzugehen, der nicht auf thermische Wirkungen allein zurückzuführen war.

Der *Magnetismus* gehörte seit Ampère's Arbeiten zu den wenig begünstigten Gebieten der Physik; wie der natürliche Magnet immer mehr durch den Elektromagnet verdrängt wurde, so musste natürlicher Weise auch die Lehre vom Magnetismus immer mehr in der Lehre vom Elektromagnetismus aufgehen. Da indessen der Magnetismus doch immer einen besonderen molecularen Zustand der Materie bedingte, so bemühte man sich umgekehrt, auch solche *moleculare Veränderungen durch den Magnetismus* nachzuweisen. R. *Hunt* machte 1846 [3]) die Beobachtung bekannt, dass unter dem Einflusse eines Magnetpoles Salze aus Flüssigkeiten in regelmässigen Curven auskrystallisiren. *Joule* [4]) beobachtete um dieselbe Zeit an Eisenstäben beim Magnetisiren durch den elektrischen Strom ein *Längerwerden*, das nur von der Länge des Stabes und der Intensität seines Magnetismus abhängt und bei dem eine Ausdehnung in der Breite nicht zu bemerken ist. W. *Wertheim* constatirte im Jahre 1852, dass ein bis zur Sättigung magnetisirter Eisenstab sich in dem Moment *demagnetisirt*, wo er eine temporäre *Torsion* erleidet, und wiederum *remagnetisirt* in dem Momente der *Detorsion*. Näher ging er drei Jahre später [6]) in einer ausführlicheren Arbeit auf dieses Thema ein. Danach magnetisiren bei weichem Eisen innerhalb der Elektricitätsgrenzen Torsionen und Detorsionen für sich allein nicht; während des Magnetisirens aber befördern sie dasselbe, wie jede mechanische Erschütterung. Gesättigter Magnetismus vermindert sich durch die Torsion, während er in der Detorsion sich wieder herstellt. Härtere Eisensorten geben nur quantitativ von diesen verschiedene Resultate. Zur Erklärung dieser Erscheinungen schienen die früheren Theorien unzulänglich. *Wertheim* nahm an, *dass der Magnetismus in Aetherschwingungen der Molecularatmosphären*

---

[1]) Pogg. Ann. LXXXIV, S. 572. — *Johann Lamont* (1805—1879), Director der Sternwarte Bogenhausen bei München.

[2]) Compt. rend. XXXV, p. 704.

[3]) Phil. Mag. (3) XXVIII, p. 1, 1846.

[4]) Ibid. XXX, p. 76.

[5]) Compt. rend. XXXV, p. 702; Pogg. Ann. LXXXVIII, S. 331.

[6]) Compt. rend. XL, p. 1234; Pogg. Ann. XCVI, S. 171.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

bestehe, welche im unmagnetischen Eisen präexistiren und durch die Magnetisirung nur polarisirt werden. Die Coërcitivkraft ist dann die Trägheit des Aethers, welche sich einer solchen Polarisation widersetzt. Nimmt man dann weiter an, dass die ponderablen Molecüle bei ihrer Drehung die Aetherschwingungen mit sich nehmen, so werden die ursprünglich gleich gerichteten Schwingungen bei der Torsion ihre Uebereinstimmung zum Theil verlieren, bei der Detorsion aber wieder erhalten. Aehnliche Molecularbewegungen benutzte dann Wertheim auch zur Erklärung der Variationen des Erdmagnetismus. Nach Wertheim dehnte G. Wiedemann [1]) die Versuche über den Zusammenhang zwischen Magnetismus und Lagenveränderungen der Molecüle noch weiter aus, ohne theoretisch so weit in die Moleculartheorie sich zu vertiefen wie jener. Danach wird ein Magnetstab, der durch einen galvanischen Strom magnetisirt und durch einen entgegengesetzten Strom wieder entmagnetisirt ist, durch blosse Erschütterungen abermals magnetisch; wie die Torsion den Magnetismus beeinflusst, so auch umgekehrt der Magnetismus die Torsion; wird ein Eisendraht während oder nach dem Durchgange eines galvanischen Stromes tordirt, so wird er magnetisch und übt während der Torsion Inductionswirkungen auf einen benachbarten Leitungsdraht aus; wie die Torsionen wirken ähnlich auch Biegungen und auch Temperaturveränderungen von Stäben u. s. w.

Die Beziehungen zwischen dem Magnetismus und den inneren Bewegungen der Körper erschienen den Physikern darum besonders interessant, weil sie nur durch eine Zusammensetzung des Eisens und des Stahls aus Molecularmagneten erklärlich und in dieser Hinsicht für die Atomistik entscheidend schienen [2]). Beetz geht in einer Abhandlung „Ueber die inneren Vorgänge, welche die Magnetisirung bedingen“ [3]), von einem Satze W. Weber's [4]) aus, nach dem die

---

[1]) Ueber den Magnetismus der Stahlstäbe, Pogg. Ann. C, S. 235; Beziehungen zwischen Magnetismus, Wärme und Torsion, ibid. CIII, S. 563; Ueber die Torsion und die Beziehungen derselben zum Magnetismus, ibid. CVI, S. 161; Ueber die Biegung, ibid. CVII, S. 439; Beziehung zwischen Torsion und Magnetismus, ibid. CVII, S. 439; Einfluss der Temperaturveränderungen auf den Magnetismus, ibid. CXXII, S. 346; Inductionsströme beim Tordiren von Eisendrähten, ibid. CXXIX, S. 616. Siehe auch „Die Lehre von der Elektricität“ III, S. 666, Braunschweig 1883. — Gustav Heinrich Wiedemann, geb. am 2. October 1826 in Berlin, 1854 Professor der Physik in Basel, 1863 am Collegium Carolinum in Braunschweig, 1866 am Polytechnicum in Karlsruhe, 1871 Professor der physikalischen Chemie und jetzt der Physik in Leipzig.

[2]) Aus diesem Grunde führt auch Fechner in seiner Atomenlehre (Leipzig 1864, S. 41) die Versuche Wiedemann's für die Atomistik an.

[3]) Pogg. Ann. CXI, S. 107, 1860. — Wilh. Beetz (27. März 1822 Berlin — 22. Januar 1886 München), Professor der Physik am Polytechnicum in München.

[4]) Elektrodyn. Maassbest., insbesondere über Diamagnetismus, Abhandl. der K. S. Gesellsch. d. Wissensch. I, S. 541, 1852.

Elektricitätstheorien, c. 1840 bis c. 1860.

Molecularveränderungen, welche beim Uebergange eines Eisen- oder Stahlstabes in den magnetischen Zustand eintreten müssen, aus vier Annahmen erklärt werden können: 1) durch die Existenz zweier magnetischen Fluida, welche unabhängig von ihrem ponderablen Träger beweglich sind (Coulomb und Poisson); 2) durch die Existenz zweier magnetischen Fluida, welche nur mit den Molecülen ihrer ponderablen Träger beweglich sind; 3) durch die Existenz beharrlicher, von den zwei elektrischen Fluidis gebildeter Molecularströme, welche mit den Molecülen drehbar sind (Ampère), und 4) durch die Existenz zweier beweglicher elektrischer Fluida, welche ohne Widerstand in bestimmten Bahnen um die ruhenden Molecüle in Bewegung gesetzt werden können. Weber hatte die letztere Hypothese angenommen; dabei aber zugegeben, dass die Erfahrung mehr zu Gunsten drehbarer Molecüle entscheide. Beetz schloss nun alle die Hypothesen aus, welche davon ausgehen, dass die elektrischen oder magnetischen Flüssigkeiten in unerschöpflicher Menge vorhanden sind, weil die Experimente sicher gezeigt hätten, dass das Verhältniss $\frac{m}{p}$, zwischen der Stärke des Magnetismus $m$ und der magnetisirenden Kraft $p$, kein constantes sei, wenn es sich auch einer festen Grenze nähere. Danach blieben von den obigen nur die zwei Hypothesen übrig, dass die elektrischen oder magnetischen Flüssigkeiten, deren Scheidung das Magnetischwerden bedingt, nur in endlicher Menge vorhanden sind, oder dass das Magnetisiren nur durch eine Drehung der Molecüle erfolgt, die entweder wegen der immer vorhandenen Scheidung der Flüssigkeiten oder wegen der die Molecüle stets umkreisenden Molecularströme als Molecularmagnete zu betrachten sind. Schon Wiedemann's Versuche hielt er genügend zur Entscheidung für die letztere Hypothese. Zum weiteren Beweise liess er aus Eisenlösung nach R. Böttger's Methode Eisen elektrolytisch in cohärenter Form zwischen den Schenkeln eines Magneten sich niederschlagen. Er erhielt so glasharte und stark magnetische Eisenplatten, die bei allen Ent- und Remagnetisirungen eine ganz entschiedene Vorliebe für ihre Magnetisirung im ursprünglichen Sinne behielten. Diese Erscheinung, welche der elastischen Nachwirkung zu vergleichen und die auch Wiedemann schon angedeutet hatte, schien ihm für die Annahme einer Drehung der Molecüle beim Magnetisiren und somit für die Annahme von Molecularmagneten zwingend zu sein.

---

4.

## Vierter Abschnitt der Physik in den letzten hundert Jahren.

Von circa 1860 bis circa 1880.

---

### Anfänge einer kinetischen Physik.

Seit dem Anfange dieses Jahrhunderts bis auf unsere Zeit hatte man sich einer dualistischen Auffassung der Materie in der Physik mehr und mehr genähert und stellte nun der ponderablen Materie statt der vielfachen Imponderabilien nur einen einzigen unwägbaren Stoff, den Aether, gegenüber. Mit diesem Dualismus der Materie war dann auch ein Dualismus der Kraft verknüpft. Für die ponderable Materie behielt man die Annahme einer unvermittelt in die Ferne anziehend oder abstossend wirkenden elementaren Urkraft ohne Weiteres bei; die vielfachen Wirkungen des Aethers aber musste man nothwendiger Weise, da man demselben doch nicht ebenso vielfache, verschiedene primitive Kräfte zueignen konnte, auf besondere Bewegungen zurückführen. Dabei ist indessen der Dualismus der Materie von dem Dualismus der Kraft generell ganz verschieden. Fasst man nur die verschiedenen Arten der Materie nicht als absolut elementar auf, so lässt sich wohl auch unter Voraussetzung einer an sich unterschiedslosen Urmaterie, die unserem Verständnisse immer am nächsten liegen wird, das Dasein relativ elementarer, nach ihren inneren Bewegungen und Anordnungen verschiedener Materien begreifen. In der That haben auch in der neuesten Zeit die meisten Physiker die Frage nach einer letzten Identität der beiden einander gegenüberstehenden Arten

von Materien mindestens offen gelassen, und vielfach hat man den Unterschied der ponderablen Materie vom Aether nur in die grössere innere Bewegung und die dadurch bedingte grössere Zertheiltheit des letzteren gesetzt. Dieser Anschauung gegenüber bedeutet der Dualismus der Kraft einen absoluten Widerspruch; denn wenn die beiden entgegenstehenden Elementarmaterien im Grunde identisch und nur durch die Bewegung graduell verschieden sind, dann ist die Voraussetzung einer Urkraft als Eigenschaft der einen Materie bei einem vollständigen Mangel dieser Eigenschaft in der anderen ohne jede innere Wahrscheinlichkeit. In dem Gefühle der Bedeutung des Widerspruches hat man auch immerwährend versucht, den Dualismus der Kräfte aufzuheben und durch eine einheitliche Anschauung zu ersetzen, und zwar ist dies auf eine dreifache Weise geschehen.

Die Physico-mathematiker, welche auf Newton, und die speculativen Physiker, welche auf Kant's Metaphysik fussen, betonen, dass jede Kraftwirkung ihre letzte Ursache in den primitiven, attractiven und repulsiven Eigenschaften der Materie habe und dass auch alle Bewegungen des Aethers auf solche Eigenschaften zurückgeführt werden müssten. Diese Annahme bedeutet aber, wenn sie in ihrer vollen, erkenntnisstheoretischen Strenge gemacht wird, für die Kant'sche Philosophie eine Inconsequenz, denn letzte Ursachen können nach diesem Systeme niemals Phänomena, sondern nur Noumena sein, und für den Naturwissenschaftler ein Hinausschreiten aus seinem Gebiete, denn die letzten Ursachen gehören als unbedingte in das Gebiet der Freiheit und entbehren der naturwissenschaftlichen Nothwendigkeit.

Eine andere und in unserer Zeit sehr zahlreiche Partei der Physiker hat darum in anderer Weise die Einheit der Kräfteanschauung dadurch zu wahren gesucht, dass sie ein weiteres Eingehen auf die in den Materien enthaltenen Wirkungsfähigkeiten überhaupt vermied und nur diese Arbeitsfähigkeiten selbst ihrer Art und ihrer Grösse nach betrachtete und bestimmte. Die Handhabe zu einer solchen begrenzten Untersuchungsweise bot leicht das Gesetz von der Erhaltung der Kraft. Die Entdecker dieses Gesetzes hatten schon darauf aufmerksam gemacht, dass sich das-

selbe nicht auf die letzten Ursachen der Erscheinungen, auf die primitiven Kräfte als unveränderliche Urqualitäten der Materien, sondern nur auf die begrenzten Arbeitsfähigkeiten beziehen könne, die einem Körper vermöge seiner Lage und Bewegung innewohnen. Um diesen Standpunkt schärfer zu markiren, gab man bald danach auch den Ausdruck Kraft in der Bedeutung als begrenzte Arbeitsfähigkeit ganz auf und nahm für diese Arbeitsfähigkeit den Namen Energie an, und eben in der Proclamation des Gesetzes von der Erhaltung der Energie als eines ganz allgemeinen Princips aller Naturwissenschaft glaubte man das Mittel gefunden zu haben, über die Schwierigkeiten, die in den Begriffen der Kraft und der Materie liegen, hinweg zu kommen. In der That erschien nach der Feststellung der vollkommenen Umwandlungsfähigkeit aller Energieformen in einander und der vollkommenen Constanz der Quantität der Energie bei allen diesen Transformationen ein näheres Eingehen auf die Vorgänge in der Materie, auf die der directen Beobachtung verschlossenen Uebertragungen der Bewegungen von der Masse auf die inneren Theile derselben nicht mehr nöthig. Sobald nur die Art des Ueberganges einer Energieform in eine andere und die verhältnissmässige Werthigkeit der beiden Formen einmal festgestellt war, so konnte man auch diesem Gesetze gemäss aus der Grösse der transformirten Energie die Grösse der neu entstandenen Energie ohne Weiteres berechnen. Die quantitative Behandlung der Naturerscheinungen wurde dadurch von der Betrachtung der inneren Vorgänge in der Materie unabhängig, und selbst da, wo diese Vorgänge ganz unbekannt waren, bot doch das Gesetz von der Erhaltung der Energie eine sichere Brücke von einer direct beobachtbaren Naturerscheinung zur anderen. Darin liegt die weittragende Bedeutung dieses Naturprincips, sein gewaltiger Einfluss auf die gesammte Naturwissenschaft und seine eminent fördernde Kraft.

Indessen blieb doch auch diese Auffassung der Naturerscheinungen nicht ohne ihre grossen Schwierigkeiten, die allerdings weniger bei der Benutzung als vielmehr bei der Begründung des Fundamentalprincips sich wirksam zeigten. Mochte man dem Begriffe der Energie auch noch so viel absolute Realität [1]) beilegen, so war doch damit

[1]) Tait sagt in seinem interessanten und lesenswerthen Werke „Die Eigenschaften der Materie“ (Wien 1888, übersetzt nach „Properties

bei der Unbestimmtheit der Art der Wirkungsfähigkeit in den Körpern über die Constanz oder Veränderlichkeit derselben physikalisch wenigstens ohne Zuhülfenahme erkenntnisstheoretischer Gründe noch nicht viel ausgemacht, und so allgemein man auch das Gesetz von der Erhaltung der Energie als physikalisches Grundprincip anerkannte, so unsicher und uneinig blieb man über die richtige Begründung desselben. Die Experimentalphysik konnte das Princip in sehr vielen Fällen messend verificiren und damit auch eine ganz allgemeine Geltung desselben höchst wahrscheinlich machen; für einen so fundamentalen Gebrauch des Princips aber, wie wir ihn vorher charakterisirt, schien doch vielen Physikern jener inductive Beweis noch zu ungenügend. Dazu kam, dass das Gesetz selbst die Energie nur nach einer Seite, ihrer quantitativen Unzerstörbarkeit nach beherrscht, über die andere Seite derselben, ihre qualitative Umwandlungsfähigkeit, gar nichts aussagt. Diese beiden Ursachen führten in gleicher Weise von der Energie auf die Quellen derselben zurück und da die Annahme verschiedener, an besondere Materien gebundener Elementarkräfte der Vorstellung einer allseitigen Umwandlungsfähigkeit der Energieformen in einander ebenso feindlich erschien, als die Voraussetzung einer einzigen, nur mit verschiedenen inneren Bewegungen begabten Materie sich derselben angemessen zeigte, so wandte sich nun ein grosser Theil der Phy-

---

of matter", Edinburgh 1885): „Schon aus der alltäglichen Erfahrung muss er (der Leser) die Ueberzeugung gewonnen haben, dass die Materie objective Existenz hat... Dagegen wird es für manchen Leser etwas Neues sein, wenn er erfährt, dass der Energie ebenso gut objective Existenz zukommt wie der Materie (S. 3) . . . Es ist experimentell nachgewiesen, dass die Energie ebenso wenig wie die Materie vom Menschen zerstört oder erschaffen werden kann. Sie existirt daher unabhängig von den Sinnen und dem Denkvermögen des Menschen, obwohl sie nur mit deren Hülfe wahrgenommen wird." (S. 4.) Dabei aber zeugt der nachfolgende Satz dafür, dass Tait selbst den Drang fühlt, den Gegensatz von Materie und Energie auf den von Materie und Bewegung zurückzuführen oder, noch besser, durch die Einheit der bewegten Materie zu ersetzen: „Ein sehr wichtiger Umstand... ist der, dass Energie nie anders als in Verbindung mit der Materie angetroffen wird. Man kann daher die Materie als das Vehikel oder das Receptaculum der Energie bezeichnen, und es ist bereits mehr als wahrscheinlich, dass schliesslich alle die verschiedenen Formen der Energie als abhängend von Bewegungszuständen der Materie erkannt werden." (S. 4.) [Dass, nebenbei bemerkt, in dem Werke auch manches schiefe Licht auf die methodische und geschichtliche Entwickelung der Physik geworfen wird, erscheint bei der bekannten extremen Urtheilsart Tait's natürlich.]

siker dazu, alle Energie aus der Bewegung abzuleiten und alle physikalischen Erscheinungen rein kinetisch zu begründen. Nicht, dass diese Physiker mit einem Male nun alle Kräfte der Materie in sich geleugnet und den Gebrauch der gewohnten Nomenclatur ganz verpönt hätten, sie verwahrten sich aber dagegen, dass man diese Kräfte als letzte Ursachen der Erscheinungen bezeichne, und hielten an der Hoffnung fest, dass auch alle bis jetzt noch nicht weiter reducirten Kraftwirkungen zuletzt noch auf innere Bewegungen der Materie als ihre Ursachen zurückgeführt werden könnten. Auch trat diese Richtung in der Physik noch kaum in allgemein systematischer und streng theoretischer Begründung auf, aber die Arbeiten drängen doch in unserer Zeit sowohl dem Stoffe als der Methode nach so sehr nach derselben hin, dass man eine rein kinetische Behandlung der Erscheinungen sehr wohl als das physikalische Ideal der neuesten Physik bezeichnen kann.

Die Veränderung der Anschauungen über das Wesen der inneren Bewegungen der Materie, wie sie vor Allem durch die Undulationstheorie des Lichtes und noch mehr durch die mechanische Wärmetheorie hervorgerufen wurde, zeigte sich zuerst in dem Verstummen aller Angriffe auf die atomistische Auffassung der Materie. Hatte man früher mit der Auflösung der Materie in blosse Kräfte die Frage nach der inneren Constitution mehr und mehr bei Seite geschoben, so zeigten Fechner, R. Grassmann u. A. in ausgedehnten, tief greifenden Arbeiten, dass die neuere Physik eine Zusammengesetztheit der Materie aus absoluten oder relativen Theileinheiten als Grundlage ihrer Entwickelungen nothwendig fordere. Mit dieser neueren Atomistik und unter dem Schutze derselben entwickelte sich dann durch Krönig, Clausius, Maxwell u. A. die kinetisch am reinsten durchgeführte, kühnste Theorie der neuen Physik, die mechanische Theorie der Gase. Ihr gelang, was man bis dahin nicht einmal für möglich gehalten, die Berechnung der Geschwindigkeit, der freien Weglänge und (genähert wenigstens) auch der Grösse der Gasmolecüle, und sie vermochte rückwärts aus ihren Voraussetzungen für die innere Reibung, die Wärmeleitungsfähigkeit der Gase etc. Resul-

tate zu gewinnen, die von der Erfahrung wohl bestätigt wurden. Der mathematischen Physik wurde dadurch ein neues Gebiet erobert, das an Fruchtbarkeit den älteren Erwerbungen nicht nachstand. Zugleich zog dieser erste Schritt in die Mechanik der Atome noch einen zweiten nach sich. An mehreren Stellen zeigte der Vergleich der Resultate der Rechnungen mit denen der Erfahrung, dass die Annahme einer einfachen Zusammensetzung der Materie aus absolut einfachen Atomen zur Erklärung der Erscheinungen noch nicht genüge, dass man vielmehr diese Atome abermals aus constituirenden Theilen, aus Atomen zweiter Ordnung, zusammengesetzt denken und dass man, neben den Bewegungen der Molecüle, auch noch intramoleculare Bewegungen in Betracht ziehen müsse. Die Physik kam damit zu einem Ergebniss, das ihre Schwesterwissenschaft, die Chemie, unabhängig von ihr schon früher erhalten, jedoch auch erst in letzter Zeit allgemeiner anerkannt hatte. Dem atomistischen Physiker aber öffnete sich dadurch auch von seinem Gebiete aus der Blick auf eine bis ins Unendliche gehende Zusammengesetztheit und damit auf eine unendliche Theilbarkeit, d. h. auf die Continuität der Materie.

Die Erfolge der kinetischen Behandlungsweise in der Gastheorie führten ganz natürlich zu dem Versuche, diese Art der Betrachtung auf die Theorie aller Materie zu übertragen [1]). Dazu war vor Allem die Erklärung der allgemeinen Attraction und specieller der Gravitation durch Bewegungen nöthig, und in der That ging man bald nach dem Auftreten der kinetischen Gastheorie dazu über, alle möglichen Arten der inneren Bewegungen auf ihre Brauchbarkeit für jenen Zweck zu untersuchen. Einerseits bemühte man sich, entsprechend der Undulationstheorie des Lichtes, auch eine Undulationstheorie der Schwere auszubilden; andererseits versuchte man die Gravitation durch einen Druck zu erklären,

---

[1]) In diesem Sinne sagte W. Thomson bei Eröffnung der Sitzung der mathematisch-physikalischen Section der British Association in Montreal im Jahre 1884: „The now well-known kinetic theory of gases is a step so important in the way of explaining seemingly static properties of matter by motion, that it is scarcely possible to help anticipating in idea the arrival at a complete theory of matter, in which all its properties will be seen to be merely attributes of motion.“ (Nature XXX, p. 417, 1884.)

der, von aller ponderablen Materie ausstrahlend, in dem Alles erfüllenden Aether sich verbreitet und von diesem wieder nach dem Körper zurückgeworfen wird. Schliesslich griff man auf die Hypothese zurück, die der kinetischen Gastheorie am nächsten lag, und leitete wie Lesage die Schwere aus den Strömen des Aethers ab, die, den Raum nach allen Richtungen hin durchziehend, von allen Seiten auf die ponderablen Körper treffen. Leider entsprach der Erfolg nicht ganz der aufgewandten Mühe. Obgleich manche der bezüglichen Arbeiten für die Aufklärung des Problems sehr werthvoll sind, so hat doch keine der aufgestellten Theorien allgemeine Anerkennung erlangen können, und in der neuesten Zeit scheinen die Hoffnungen auf eine schnelle Lösung desselben eher im Sinken als im Wachsen begriffen zu sein. Dafür aber zeigt sich ein stetes Zunehmen des Gebrauchs kinetischer Erklärungsprincipien auf allen anderen Gebieten der Physik und ihre Fruchtbarkeit lässt an ihrer Angemessenheit kaum mehr zweifeln. Die vielen sogenannten mechanischen Theorien, die in der neueren Zeit in allen physikalischen Disciplinen aufgetreten sind, dürfte man in den meisten Fällen besser als kinetische bezeichnen, und wo dieselben diesen Charakter noch nicht rein festhalten konnten, da hielten sie doch die Richtung nach einer solchen Entwickelung ein. Dass dabei die mechanische Wärmetheorie, die kinetische Theorie der Gase und die Undulationstheorie des Lichtes hauptsächlich als leitende Motive wirksam waren, ist natürlich. Die mechanische Theorie der Wärme zwang direct dazu, alle ponderablen Körper als Systeme immerwährend in sich bewegter Molecüle anzusehen, und unter dem Einflusse dieser Anschauung vereinigte sich die Lehre von den Molecularkräften mit der Wärmelehre immer mehr zu einer Mechanik der Molecüle. Wie man dabei zu einer mechanischen Verallgemeinerung der Hauptsätze der Wärmetheorie und zu einer mechanischen Begründung ihrer Fundamentalbegriffe kam, haben wir schon früher beschrieben. Jetzt werden wir die Anwendung der kinetischen Auffassung der Materie auf die Lehre von den Aggregatzuständen, ihren Transformationen und ihren Wechselwirkungen zu schildern haben. Indem sich dabei diese Formen des materiellen Daseins, entgegen

den alten Anschauungen, als continuirlich in einander übergehende Zustände aller Materie zeigten, die keine festen trennenden Grenzen haben, regten sie dazu an, die Resultate, welche die kinetische Theorie der Gase in der Theorie der Diffusion, der inneren Reibung, der Wärmeleitung u. s. w. errungen, auch auf tropfbare Flüssigkeiten und theilweise auch auf feste Körper zu übertragen. Endlich wurden auch so stark auf die Annahme von Molecularkräften gegründete Theorien, wie die der Elasticität und die der Capillarität, gezwungen, zur Erklärung der sogenannten Nachwirkungen kinetische Elemente wenigstens aufzunehmen. Ebenfalls erreichte die Optik ihre grösste, für einige Zeit das ganze physikalische und chemische Interesse in Anspruch nehmende Leistung, die Spectralanalyse, dadurch, dass sie Voraussetzungen der Undulationstheorie mit denen der mechanischen Wärmetheorie vereinigte und eine Brücke zwischen den Schwingungen des Aethers und denen der Körpermolecüle herstellte. Die Folgen dieser Neubildung zeigten sich dann nicht bloss darin, dass diese optische Analyse über die materielle Beschaffenheit der kosmischen Körper Aufschluss gab, sondern auch darin, dass sie zu neuen Hypothesen über die moleculare Beschaffenheit der Körper anregte. Auch die Theorie der ebenfalls sehr überraschend kommenden Erscheinung der anomalen Dispersion erwuchs auf diesem gemeinsamen Boden, und sogar für die Physiologie der Sinnesempfindungen erwies sich die Kinetik ungleich fruchtbarer als die Annahme besonderer Materien mit besonderen Eigenschaften. Die physiologische Optik hatte schon im vorigen Zeitraume unter dem Einflusse der Undulationstheorie ihre mächtige Entwickelung begonnen. Nun führte Helmholtz auch die bis dahin gänzlich räthselhaften Verschiedenheiten der Klangfarbe, die Eigenthümlichkeiten der Vocalklänge, sowie die ganzen Fundamente der Harmonik, die man bis dahin für allein psychisch begründet gehalten hatte, auf reine Eigenthümlichkeiten der Schwingungsbewegungen zurück. Unter dem allgemeinen Zuge der Zeit verlor zuletzt auch die Lehre von der Elektricität ihren specifisch elektrischen Charakter und wandelte sich sichtlich in eine Mechanik der Aetherbewegung um, indem sie sich auf diesem Gebiete mit der Optik geradezu zu ver-

einigen suchte. Für die Verbreitung der elektrischen Wirkungen durch den Raum besonders machte sich ein solches Bedürfniss der Umbildung geltend, für den Ursprung der elektrischen Erscheinungen, sowie für die Wechselwirkung zwischen den pondero- und elektromotorischen Kräften blieben freilich trotz mancher geistreichen theoretischen Versuche noch Schwierigkeiten genug.

Von der allmäligen Umbildung der physikalischen Disciplinen zeugt schliesslich die ganz allgemeine Durchführung des absoluten oder besser mechanischen Maasssystems durch die gesammte Physik. Für die Optik und die Akustik blieb diese Einführung eines von der Sinnesempfindung unabhängigen mechanischen Maasses noch ein unvollendeter Versuch, für das gesammte Gebiet der Elektricität aber wurde dieses Maasssystem nicht bloss theoretisch, sondern auch praktisch durchgeführt. Es diente der jetzt so gewaltig sich entwickelnden Elektrotechnik als die sichere Grundlage, ohne welche diese Entwickelung sicher nicht möglich gewesen wäre.

Damit aber enthüllte sich als das Ziel der physikalischen Entwickelung immer deutlicher eine einzige einheitliche Wissenschaft, die Physik als die Mechanik aller Materie, als die Kinetik aller materiellen Bewegungen, in der verschiedene Disciplinen nicht an sich, sondern nur nach den Formen unserer, durch die verschiedenen Sinne bedingten Anschauung zu unterscheiden sind.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

So sehr man auch in der Physik sich gegen jede Beeinflussung durch die Philosophie sträubte, so hatten doch auch in dieser Zeit die Physiker der mittelbaren Einwirkung der allgemeinen philosophischen Ideen sich nicht ganz entziehen können. Die Einstimmigkeit der Philosophen in der Negirung der atomistischen Zusammensetzung der Materie hatte auch bei den Physikern den festen Glauben an die Realität der Atome stark erschüttert. Ja die Physiker und Philosophen hatten sogar trotz aller sonstigen Kämpfe in der **Theorie der Materie** nach demselben Ziele hingestrebt. Sie waren seit langer Zeit in gleicher Weise bemüht gewesen, alle Materien in Kräfte vollständig aufzulösen, alle materiellen Probleme auf das eine gewaltige Räthsel der Kraft zu reduciren, und hatten dann im Laufe der Zeit und in der gewohnheitsmässigen Behandlung der Sachen auch das Bewusstsein von einem solchen

räthselhaften Charakter der Kraft noch mehr oder weniger verloren. In diesem Sinne definirte man nun die Physik als „die Wissenschaft von den Ursachen oder Kräften, welche die in der unorganischen Natur vorgehenden Erscheinungen und Veränderungen bedingen“ [1]) und überliess die Materie mit allen ihren Schwierigkeiten ganz der Schwesterwissenschaft, der Chemie, die ja die materiellen Probleme doch nicht umgehen konnte.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Dieser Anschauung schien auch zuerst das Gesetz von der Erhaltung der Kraft vollkommen zu entsprechen, ja sogar förderlich zu sein, indem dieses Gesetz gerade das Mittel bot, die bei der Umwandlung von Kräften in der Materie stattfindenden Vorgänge unbeachtet zu lassen und direct aus einer gegebenen Kraft die Grösse der transformirten im Voraus zu bestimmen. Es ist auch nicht zu leugnen, dass nach erlangter Anerkennung des Gesetzes eine derartige Behandlung der Naturerscheinungen mit Hülfe desselben verführerisch exact erscheint. Schliesslich aber wird man doch nicht umhin können, auf die Transformationen der Kräfte selbst einzugehen, ihre Möglichkeit zu erklären, ihr Eintreten nach den gegebenen Bedingungen zu erörtern, und dadurch wird man in letzter Instanz doch gezwungen werden, auf die Materie und zwar nicht auf deren Kräfte, in deren Begriff keine Umwandlungsfähigkeit enthalten ist, sondern auf die bei den Transformationen stattfindenden inneren Bewegungen derselben zurückzukommen. In der That begann auch direct mit der Aufstellung des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft dieser Rückbildungsprocess.

Indem man das Gesetz von der Erhaltung der Kraft zuerst an der Transformation von Wärme und mechanischer Arbeit erprobte, kam man zu der Ueberzeugung, dass diese Transformation nie möglich sein könne, wenn die Wärme nicht eine Bewegungserscheinung und zwar eine Bewegungserscheinung der inneren Theile der Materie, auch der ponderablen sei. Mit dieser That aber, welche die vorige Periode der Physik vollendete, war man wieder auf die Betrachtung der inneren Gestaltung und Bewegung, mit einem Worte, der Constitution der Materie, zurückgewiesen.

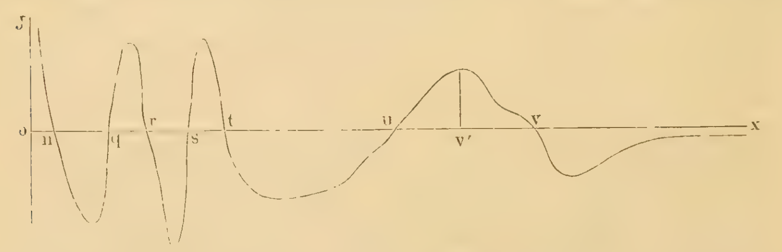
Alles, was sich zusammen bewegt, zeigt dadurch einen gewissen Zusammenhang und eine gewisse Individualisation, ja wir können schliesslich gar keine andere Individualisation als durch Bewegung begreifen. Eine Bewegung in der Materie ist anschaulich nur zu erfassen, wenn wir eine Individualisation in derselben, eine Zusammensetzung derselben aus einzelnen, einheitlichen Theilchen annehmen. Indem der Physiker einer kinetischen Theorie der Wärme sich zuwandte, indem er sich bemühte, einen grossen Theil der Naturerscheinungen aus inneren Bewegungen der Materie abzuleiten, wurde er gezwungen, zur atomistischen Auffassung der Materie als

[1]) Eisenlohr, Lehrbuch d. Physik, 9. Aufl., Stuttgart 1863, S. 1.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

der einzig möglichen zurückzukehren, und fand in diesem Zwange die sichersten Gründe für die reale Gültigkeit der Atomentheorie. Da nun auch die Chemie, indem sie eine doppelte Theilung der Materie in Molecüle und Atome annahm, wieder alle ihre Räthsel auf atomistischer Grundlage gelöst hatte, so stand jetzt gerade die Atomentheorie gefestigter und sicherer als je zuvor. Die Philosophie der Materie bekam damit ein neues Leben, zwar nicht mehr auf rein philosophischem, aber doch auf empirisch naturwissenschaftlichem Boden.

Zuerst blieb man dabei noch so viel als möglich in dem Newtonianischen Anschauungskreise und versuchte nur die alte Atomistik mit ihren Atomenkräften den neuen Erscheinungen anzupassen. In solcher Absicht bemühte sich Buys-Ballot, der nachmals so berühmte holländische Meteorolog, in einer grösseren Abhandlung vom Jahre 1849 [1]), die Möglichkeit der verschiedenen Molecularkräfte an einer einheitlich aufgefassten Materie mit atomistischer Zusammensetzung nachzuweisen. Man hat bis jetzt, so begann Buys-Ballot, zweierlei Arten von Atomen, nämlich Massen- und Aetheratome angenommen; die ersteren sollen verschiedene Formen haben, über die letzteren hat man noch nichts vermuthet; jedenfalls sind sie beträchtlich kleiner als die ersteren; vielleicht sind sie unendlich klein, vielleicht sind sie auch gar nicht da. Die Aetheratome scheinen nur dazu angenommen zu werden, um den leeren Raum zwischen den Massenatomen auszufüllen und um der Ungereimtheit zu entgehen, in einem und demselben Theilchen abstossende und anziehende Kräfte zugleich annehmen zu müssen. Da aber das erstere auf diese Weise doch nicht möglich und jene Ungereimtheit nicht grösser ist als die Annahme zweier ganz verschiedener Arten von Materie, so kann man auch annehmen, dass




jedes Massenatom der einzig vorhandenen Materie, indem es die anderen Individuen an sich zieht, auch noch das Bestreben hat, sich selbst auszubreiten, d. h. dass in jedem Atom zwei Kräfte, eine abstossende und

---

[1]) Scheets eener physiologie van het onbewerktuigte ryk de natuur, Utrecht 1849. In den „Fortschritten der Physik im Jahre 1849", Bd. V, giebt Buys-Ballot selbst ein ausführliches Referat über diese Arbeit. Christoph Heinrich Dietrich Buys-Ballot, geboren am 10. October 1817 in Klötingen (Prov. Seeland), Prof. der Mathematik in Utrecht, dann Director des Königl. meteorologischen Instituts daselbst.

eine anziehende, zugleich existiren. Diese beiden Kräfte werden sich dann zu einer Kraft zusammensetzen, die nach den verschiedenen Gleichgewichtslagen der Atome für mehrere Punkte des Raumes zu Null wird und dabei ihr Zeichen wechselt, und die also, wenn $x$ die Entfernung zweier Atome bedeutet, durch die Formel

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

$$f(x) = -\frac{a}{x^2} + \frac{b}{x^3} - \frac{c}{x^4} + \frac{d}{x^5} - \cdots$$ [1]

dargestellt werden kann, wo $a$, $b$, $c$, $d$ . . . Coefficienten sind, die noch von der Form der Atome abhängen. Auf dieser Abhängigkeit beruht die chemische Verschiedenheit der Stoffe.

Auf ein Atom wirkt aber nicht bloss ein zweites, sondern üben alle benachbarten ihre Einflüsse aus. Alle diese Wirkungen lassen sich wieder in eine Formel

$$F(x) = -\frac{A}{x^2} + \frac{B}{x^3} - \frac{C}{x^4} + \frac{D}{x^5} - \cdots$$

zusammenfassen, wo die Grössen $A$, $B$, $C$, $D$ . . . nun aus den Grössen $a, b, c, d \ldots$ zusammengesetzt sind und also ausser von der Form der Atome auch noch von der Anordnung derselben abhängen. Bei einem und demselben Stoffe sind verschiedene Gleichgewichtszustände zu beobachten. Im festen, flüssigen und gasförmigen Zustande und bei unendlichem Abstande der Atome ist die Kraftresultante gleich Null, vielleicht auch bei verschiedenen allotropischen Modificationen. Die Körper in der Ruhe sind im Gleichgewicht, aber nicht in sich selbst, sondern unter dem Einfluss der benachbarten Theilchen; ändern sich die letzteren, so muss sich auch der Gleichgewichtszustand der Körper ändern. Bringt man zwei Systeme zusammen, die nur unter Einfluss ihrer Umgebung im Gleichgewicht waren, so muss dieses aufhören, die Systeme werden in Schwingungen gerathen, die von uns als Elektricität erkannt werden und die, falls sie stark genug sind, auch Theile des einen Systems in das andere überführen und so chemische Veränderungen zu Stande bringen können. Veränderungen des Gleichgewichts werden hervorgebracht durch einfache Berührung, oder durch Licht und Wärme, oder durch Elektricität, oder vielleicht auch durch den Schall, welches letztere allerdings die Beobachtung noch nicht gelehrt hat.

Wärme ist der Zustand, wo die Theilchen der Körper in transversalen stehenden Schwingungen sind, im Aether sind diese Schwingungen fortschreitend als strahlende Wärme. Die Intensität der Wärme ist der lebenden Kraft $\Sigma v^2$ proportional, denn die höheren Temperaturen erhalten mehr Kraft, zugleich aber kommen neue Schwingungen von kürzerer Wellenlänge hinzu. Die Constanten in der Kraftformel scheinen lineare Functionen der Temperatur zu sein. Die Gesetze des Lichts

[1] Die beigefügte Abbildung veranschaulicht die Form der $f(x)$, die Abscissen entsprechen den Entfernungen der Atome, die Ordinaten den Kraftintensitäten.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

sind mit denen der Wärme identisch, so dass nur die Namen gewechselt zu werden brauchen. Die Elektricität beruht auf longitudinalen stehenden Schwingungen der Körpertheilchen, fortschreitende longitudinale Schwingungen im Aether bilden die strahlende Elektricität. Es giebt nur eine Art von Elektricität, der scheinbare Unterschied der beiden ist vielleicht darin gelegen, dass in der einen die verdichtende, in der anderen die verdünnende Seite der Welle vorangeht. Die Elektricität muss, wegen der longitudinalen Schwingungen, stärker noch als die Wärme Veränderungen des Aggregatzustandes und chemische Veränderungen einleiten. Die treibende Kraft des galvanischen Stromes ist die Neigung der Bestandtheile der Flüssigkeit zu denen der Metalle; die regulirende Kraft ist proportional der Grösse des gestörten Gleichgewichts an allen Stellen, wo heterogene Theilchen einander berühren. Bei der Berührung von Kupfer und Zink schreitet die positive Welle durch das Zink, die negative durch das Kupfer; die Wassertheilchen drehen sich nach der Theorie von Grothuss, und alles geräth in Schwingungen. Aber bei diesen Schwingungen treten einige Theilchen über den labilen Gleichgewichtszustand hinaus, um so mehr, je stärker die Schwingung ist. Diese Theilchen verbinden sich dann, das Zink mit dem Sauerstoff und das Kupfer mit dem Wasserstoff. In dem letzteren Falle jedoch giebt es kein Gleichgewicht, und es entweicht der Wasserstoff, wenn nicht ein Salz anwesend ist, aus dem der Wasserstoff das Metall ausscheidet. Durch dieses Entweichen oder Ausscheiden wird der alte Zustand wiederhergestellt und der Vorgang immer neu hervorgerufen. Der Contact ist also der Anfang, die chemische Veränderung die Ursache des Fortganges des Stromes, vergleichbar mit dem Vorgange in Capillarröhren, aus denen man immer das gestiegene Wasser wegnimmt.

Ballot's Vorstellung von der Wirkungsart der zwischen den materiellen Theilchen statthabenden Kräfte, sowie seine Intensitätscurven stimmen ganz, wie er selbst, allerdings erst nach Aufstellung seiner Theorie, bemerkte, mit den schon von Boscowich gegebenen Vorstellungen überein [1]). Aber wie zu Boscowich's Zeiten war man auch jetzt der Ansicht, dass ein Dualismus der Materie als Ursache der attractiven und repulsiven Kräfte noch eher denkbar sei, als die simultane Existenz vieler einander gegenseitig vernichtenden Kräfte an einer Materie. Darüber aber, dass man die einzelnen Glieder der $f(x)$ als besondere Kräfte zu denken habe, war Niemand, wohl auch Ballot selbst nicht, in Zweifel, und damit ging man auch ohne Weiteres über die Boscowich-Ballot'sche Kraftvorstellung zur Tagesordnung über.

Weniger auf Neuerungen, als vielmehr darauf bedacht, die Atomistik theoretisch endlich vollkommen zu sichern, sie als die nach dem jeweiligen

---

[1]) Siehe Bd. II, S. 330. Auch Giuseppe Belli hatte (Giorn. di fisica di Pavia, 1814) ähnliche Anschauungen über die Kräfte der Materie vertheidigt.

Stande der Wissenschaft einzig mögliche Anschauung von der Materie festzustellen, wandte sich Fechner in seiner „Atomenlehre" von 1855 [1]) vor Allem gegen die philosophischen Gegner derselben, die die Ursache seien, dass die Theorie selbst unter den Naturforschern noch nicht die volle und allgemeine Anerkennung gefunden habe, die sie verdiene. „Gelänge es mir, so sagt Fechner in dem Vorwort zur ersten Auflage, mit meiner Darstellung der Philosophie auch nur eine Seele abzustreiten, die sich mit ihr in jene dunkle Tiefe der Betrachtungen verloren geben will, wo Alles nur Heulen und Zähnklappen und jeder wider den Anderen ist, so würde ich schon glauben, etwas geleistet zu haben."

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Fechner nimmt also an, dass alle Materie und zwar die ponderable, wie auch der Aether, d. i. das „Substrat der Bewegungen, auf welchen die Erscheinungen des Lichts, der strahlenden Wärme, des Magnetismus und der Elektricität (wahrscheinlich gemeinsam) beruhen", aus Atomen zusammengesetzt ist. Die zwingenden Beweise dafür findet er zuerst in den Erscheinungen des Lichtes und der Wärme. Die Undulationstheorie des Lichtes fordert nothwendig, wie eine atomistische Zusammensetzung der ponderablen Materie, so auch eine atomistische Zusammensetzung des Aethers. „Von jeher haben die gründlichsten Mathematiker und Physiker anerkannt, dass die Farbenzerstreuung gänzlich unvereinbar sei mit der Undulationstheorie des Lichtes, so dass hierin lange der einzige Grund gelegen hat, weshalb man die in jeder Beziehung so viel unwahrscheinlichere und neuerdings aus durchschlagenden Gründen gänzlich aufgegebene Emissionstheorie der Undulationstheorie vorzog. Nun aber haben die neueren Untersuchungen von Cauchy gezeigt, dass diese Unvereinbarkeit doch bloss in so fern bestehe, als man annimmt, dass die Lichtwelle sich durch den Aether wie durch ein Continuum fortpflanzt, dass dagegen die Gesetze der Farbenzerstreuung mit denen der Brechung in einer Consequenz aus der Grundansicht der Undulationstheorie hervorgehen, wenn man die Theilchen des Aethers discret setzt, ja dass die Farbenzerstreuung bei der Brechung dann ebenso nothwendig als die Brechung selbst gefordert ist. Also die Frage, ob Atomismus oder nicht, ist eine Lebensfrage für die Undulationstheorie, wie die Frage, ob Undulationstheorie oder nicht, eine Lebensfrage für die Physik ist." Ebenso wie die Farbenzerstreuung ist auch die Polarisation des Lichtes nur auf Grund der Atomistik erklärbar. Die Polarisation des Lichtes fordert zu ihrer Er-

[1]) Die physikalische und philosophische Atomenlehre, Leipzig, 1855, 2. Aufl. 1864. Gustav Theodor Fechner (19. April 1801 Gross-Särchen i. d. Lausitz — 18. November 1887 Dresden), von 1834 bis 1839 Prof. der Physik in Leipzig, dann von 1839 bis 1843 wegen eines schweren Augenleidens ausser Thätigkeit, wurde er nach seiner Genesung im letzteren Jahre wieder Prof. der Naturphilosophie und Anthropologie in Leipzig.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

klärung transversale Schwingungen des Lichtäthers. Der Streit zwischen Fresnel und Poisson hat aber klar gezeigt, dass in einem continuirlichen Medium alle transversalen Schwingungen sehr bald verschwinden und in longitudinale übergehen müssen, während in einem aus discreten Theilchen bestehenden Medium solche Schwingungen sehr wohl sich fortpflanzen können. Poisson hat danach auch alle seine Untersuchungen über die Elasticität, Capillarität und Wärme im atomistischen Sinne geführt und an der Behandlung der Optik in diesem Sinne hat ihn nur der Tod gehindert. Wie die Optik, hat auch die Thermotik die Atomistik unbedingt nöthig. „Die Erscheinungen der Wärmefortpflanzung durch die Körper und der Wärmestrahlung sind sehr disparater Art. Dort schleicht die Wärme langsam durch die Körper fort nach scheinbar eigenthümlichen Gesetzen, hier pflanzt sie sich mit einer, der des Lichtes vergleichbaren Schnelligkeit nach ähnlichen Gesetzen als dieses fort. Doch müssen beiderlei Fortpflanzungsweisen nothwendig in allgemeinen Gesetzen der Wärmelehre zusammenhängen. Fourier hat gezeigt, dass ein solcher Zusammenhang sich ergiebt, dass die Gesetze der Wärmeleitung sich unter die der Strahlung von selbst unterordnen, sofern man nur die wägbaren Körper aus discreten Theilchen bestehend denkt, welche die Wärme einander zustrahlen.“ Auch das Sinusgesetz der Wärmeausstrahlung ist nur „eine natürliche Folgerung der Schichtung der Körper aus Atomen, dagegen im Sinne der Continuität der Materie kein haltbarer Weg physikalischer Ableitung zu Gebote steht“.

Eine zweite Art von Gründen leitet Fechner aus der nothwendigen ursächlichen Verbindung der magnetischen mit den elektrischen Erscheinungen her. Die vielfachen Erscheinungen, welche den Magneten und den elektrodynamischen Solenoiden gemeinsam sind, fordern ein gemeinsames Erklärungsprincip für Magnetismus und Elektricität. Als ein solches stellt sich die Ampère'sche Theorie dar, die auch längst allgemein anerkannt ist, und die jedenfalls so gedacht werden muss, dass man die elektrischen Kreisströme, die den Magneten erzeugen, nicht um die Achse desselben im Ganzen, sondern um die einzelnen Partikel in homologem Sinne laufend annimmt. Diese Partikel aber, „um welche die elektrischen Ströme laufen, muss man sich nothwendig atomistisch denken, weil in einem Continuum aus leitender Masse, wie sich der Dynamiker das Eisen denkt, getrennte elektrische Kreisströme überhaupt nicht bestehen könnten; ganz gleichgültig, wie man sich das Grundwesen der Elektricität dabei denken will“. Für solche atomistische Zusammensetzung der Magnete aus Elementarmagneten sprechen dann auch die Veränderungen des Magnetismus eines Magneten durch Torsion, durch tönende Schwingungen u. s. w.

Als eine weitere Classe von Erscheinungen, welche für die Atomistik sprechen, führt Fechner den allgemeinen Zusammenhang aller sogenannten Molecularerscheinungen an. „Mit der Vorstellung discreter Körpertheile ist die Möglichkeit einer verschiedenen Nähe und

Ferne derselben, einer abwechselnden Näherung und Entfernung, einer verschiedenen Entfernung nach verschiedenen Richtungen, einer verschiedenen Gruppirung, abgeänderter Kraftbeziehungen je nach Anordnung und Entfernung, hiervon abhängiger stabiler und nicht stabiler Lagen des Gleichgewichts, die Möglichkeit von Uebergängen aus einer Lage stabilen Gleichgewichts in die andere, von continuirlichen Bewegungen in Bezug zu einander, mit Eins gegeben, und die Gesammtheit dieser Möglichkeiten sehen wir durch einen Kreis von Erscheinungen verwirklicht, die freilich einzeln genommen sich auch anderer Deutung fügen mögen, doch zusammen gleichsam nur wie Strahlen des Sternes der Atomistik erscheinen, nur in deren Grundidee den Mittelpunkt und die Verknüpfung finden, als da sind die Verschiedenheiten, die Wechsel, die Uebergänge der Dichtigkeit, des Gefüges, der Aggregatzustände der Körper, die Blätterdurchgänge und sonst verschiedenen Eigenschaften der Krystalle nach verschiedenen Richtungen, die Elasticität und das Ueberschreiten der Elasticitätsgrenze, die continuirlichen organischen Bewegungen. Mit diesem Zusammenhange der Erscheinungen des Wägbaren steht der früher besprochene Zusammenhang der Erscheinungen des Unwägbaren selbst im innigsten Zusammenhange und mit dem Gesammtzusammenhange dieser physischen Erscheinungen noch der Zusammenhang der chemischen. In der That ist mit der Discretion der Theilchen nun auch noch die Möglichkeit gegeben, dass die Theilchen verschiedener Körper zwischen einander eindringen, dass sie ungeändert wieder zwischen einander hervortreten, dass sich dieselben Bestandtheile in verschiedenen Anordnungen gruppiren, und, welches auch die Kraftbeziehungen zwischen den verschiedenartigen Atomen sein mögen, so lässt sich übersehen, dass ein Zustand stabilen Gleichgewichts nicht wohl anders bestehen könne, als bei gleicher Abwägung ihrer Kräfte durch gleichförmige Austheilung zwischen einander; und hiermit haben wir die Auflösung, Verbindung und Scheidung, die festen Proportionen, die Isomerie, einschliesslich Metamerie und Polymerie, in derselben einfachen Grundvorstellung begründet, die jene physikalischen Verhältnisse des Wägbaren und Unwägbaren in Eins verknüpfte."

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Von den Fällen der Isomerie führt Fechner besonders einen an, der für die Erklärungskraft der Atomentheorie ein glänzendes Zeugniss ablegt. Es giebt „einige Fälle der Isomerie, wo die isomeren Modificationen derselben Substanz sich sonst absolut in Nichts physisch und chemisch unterscheiden, als: erstens in der Unmöglichkeit, ihre, übrigens gleichen (hemiedrischen), Krystallformen zu superponiren, in welcher Hinsicht sie sich ähnlich verhalten, wie ein rechter und linker Handschuh, die man auch bei sonstiger Gleichheit nicht superponiren kann, und zweitens darin, dass sie der Polarisationsebene des Lichtes eine entgegengesetzte Drehung, respective nach rechts und links, aber ganz um dieselbe Grösse ertheilen, so die rechts und links drehende Weinsäure, sowie ihre Verbindungen . . . Wie stellt der Dynamiker sich den Grund hier-

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

von vor? Er stellt sich ihn wie gewöhnlich gar nicht vor; er hat wieder nur sein Wort dafür . . . Im Sinne der atomistischen Vorstellung aber leuchtet ein, dass unter den verschiedenen Möglichkeiten, wie Körper aus Molecülen von gegebener Gestalt bestehen können, auch die ist, dass diese Molecüle sich bei sonst ganz gleicher Beschaffenheit in zwei Körpern zu einander so wie rechte und linke Handschuhe oder Hände verhalten, dass ein Körper so zu sagen aus lauter rechten, der andere aus lauter linken Händen besteht, die, indem sie ihre homologen Seiten nach denselben Richtungen kehren, auch im Ganzen entgegengesetzt angeordnete Systeme bilden. Unter dieser Voraussetzung ergiebt sich Alles fast von selbst, wie es der Erfolg an der rechts und links drehenden Weinsäure zeigt [1]".

Für den Physiker hält Fechner die Annahme der Atomistik einfach für geboten; aber auch dem Philosophen bleibt nach Allem kein Grund, gegen dieselbe aufzutreten, denn alle philosophischen Gründe, die man bisher gegen die Atomistik angeführt, treffen gar nicht die physikalische, sondern nur eine selbst fabricirte philosophische Atomentheorie. Der Physiker behauptet gar nicht, wie der Philosoph immer vorgiebt, absolut untheilbare Atome. „Was der Physiker als Atomistiker verlangt, sind überhaupt nur discrete, für uns endlich nicht weiter theilbare Massen, in welche die Körper oder zunächst das Molecül des Körpers zu zerfällen; ob sie an sich noch theilbar sind, ist, wie gesagt, nicht seine Sache zu beurtheilen. Es kann sich möglicherweise damit ebenso verhalten wie mit den Weltkörpern, die in Bezug zu einander wahre Atome sind, weil es keine Kräfte giebt, etwas von dem einen auf den anderen überzuführen; doch sind sie theilbar an sich . . . So kann der Physiker auch gar nicht zu behaupten wagen, dass der Raum zwischen seinen Atomen absolut leer, dass nicht vielmehr ein feines continuirliches Wesen sich noch zwischen ihnen erstreckt, was nur auf die Erscheinungen, die er beurtheilen kann, keinen Einfluss mehr hat . . . Auch zwischen den discreten Aetheratomen, die der Physiker zur Repräsentirung der Lichterscheinungen noch nöthig hat, könnte also nach allen seinen Versuchen und Rechnungen noch ein feinerer continuirlicher Aether sein. Der Physiker spricht nur nicht von solchen Möglichkeiten, die ihm gleichgültig sind, weil sie ihm nichts leisten. Können sie aber dem Philosophen etwas leisten, so ist es seine Sache, sich damit zu befassen . . . Der Physiker braucht nur zunächst Atome, nicht zuletzt Atome. Gesteht der Philosoph dem Physiker seine Atome zunächst zu, so kann ihm dieser gern seine Raumerfüllung zuletzt zugestehen; Beides widerspricht sich nicht."

---

[1] Diesen Gedanken haben in fruchtbarster Weise die Chemiker Le Bel und van't Hoff seit dem Jahre 1875 zur Erklärung structuridentischer, aber optisch differenter Verbindungen angewandt. (Siehe auch Wislicenus, Tageblatt der 60. Naturforscherversammlung, Wiesbaden 1887, S. 53.)

Als gesichertes Fundament der physikalischen Atomistik betrachtet Fechner die folgenden Sätze: „Die wägbare Materie ist räumlich in discrete Theile getheilt zu denken, wozwischen eine unwägbare Substanz (Aether) sich findet, über deren Natur und Verhältnisse zur wägbaren Materie zwar noch nach vieler Hinsicht Unsicherheit besteht, die aber jedenfalls nicht minder als jene räumlich zu localisiren und in discrete Theile getheilt zu denken ist, wozwischen nun entweder ein absolut leerer Raum besteht oder nur ein Etwas ist, was von der Philosophie immerhin ihrer Idee der Raumerfüllung zu Liebe angenommen werden mag, aber keinen Einfluss mehr auf die physischen Erscheinungen hat, also auch nicht vom Physiker berücksichtigt werden kann . . . Die letzten Atome sind entweder an sich unzerstörbar oder es sind wenigstens im Bereiche der Physik und Chemie keine Mittel gegeben, sie zu zerstören, und liegen keine Gründe vor, eine je eintretende Zerstörung oder Verflüssigung derselben anzunehmen. Von diesen letzten Atomen vereinigen sich im Gebiete des Wägbaren mehr oder weniger zu kleinen Gruppen (sog. Molecülen oder zusammengesetzten Atomen), die weiter von einander entfernt sind, als die Atome in jeder Gruppe für sich; eine Stufenleiter, die sich noch höher bauen kann, so dass kleinere Gruppen sich abermals zu grösseren vereinigen . . . In umgekehrter Richtung verfolgt, kann man sagen, die Körper gliedern und untergliedern sich im Allgemeinen in grössere und kleinere Gruppen von Theilchen, herab bis zu letzten Atomen, von denen wohl jene, aber nicht diese zerstörbar sind. Vom Abstande der letzten Atome ist nur so viel gewiss, dass er sehr gross im Verhältniss zu den Dimensionen der betreffenden Atome. Von den absoluten Dimensionen der Atome, ja ob die letzten Atome angebbare Dimensionen haben, ist nichts bekannt. Den Molecülen oder zusammengesetzten Atomen kann eine bestimmte Gestalt als Umriss der von ihnen befassten Gruppe beigelegt werden, von der Gestalt der letzten Atome ist nichts bekannt. Die Kräfte der Atome sind theils anziehender, theils abstossender Natur; mindestens ist es bis jetzt noch nicht geglückt, sie auf bloss anziehende zurückzuführen. Sie wirken nach Functionen der Distanz der Theilchen. Das genaue Gesetz der Kräfte ist nicht bekannt . . . Was die Constitution des Aethers im Himmelsraume und in den Körpern insbesondere anlangt, so besteht er bemerktermaassen nicht minder als die wägbaren Körper aus Theilchen, die in Entfernungen von einander befindlich sind. Diese Entfernungen sind so gross, dass die Dimensionen der Theilchen dagegen verschwinden. Eine Schwere des Aethers kann, wenn sie stattfindet, bei allen Erscheinungen des Lichtes gegen die anderen Kräfte, wovon diese Erscheinungen abhängen, vernachlässigt werden, so dass der Aether in diesem Bezuge sich als nicht schwer ansehen lässt. Er ist zwar nicht ganz incompressibel, seine Theilchen lassen sich aber ohne Vergleich leichter gegen einander verschieben, als durch Zusammendrückung einander nähern. Er ist im Besitze der vollkommensten

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Elasticität, d. h. die Kraft, mit der ein aus der Lage seines Gleichgewichts (Ruhepunkt) gebrachtes Aetheratom in diese Lage zurückzukehren strebt, ist der Entfernung vom Ruhepunkt genau proportional... Die Dichtigkeit und Elasticität des Aethers ist in Körpern von verschiedener Beschaffenheit verschieden."

Ueber diese Sätze, die Fechner mit dem richtigen Blick und dem sicheren Verständniss des allseitig gebildeten Physikers und Philosophen aus dem Streite der Meinungen herausgeschält hat und die als Fundament unserer Anschauung bis heute geblieben sind und wohl auch bleiben werden, ist nicht weiter zu verhandeln. Dagegen sind einige weitere Capitel, vor Allem dasjenige über den Begriff der Kraft und sein Verhältniss zum Begriff der Materie, sowie das über die Wesenheit der Atome charakteristisch für die Anschauungen der damaligen Zeit. Der Physiker, welcher die Kenntniss der historischen Entwickelung seiner Wissenschaft nicht für nöthig, das Studium der Geschichte für eine unnütze Zeitverschwendung hält, die höchstens stagnirenden Wissenschaften angemessen sein könnte, schöpft diese Ueberzeugung wohl aus der Meinung, dass alle Leistungen der älteren physikalischen Epochen für die gegenwärtige unbrauchbar und in sich schwach seien, während seit Beginn der neueren Zeit, nach Festsetzung der wichtigsten wissenschaftlichen Fundamente, diese sich auch immer unverändert erhalten hätten. Zu welcher Zeit dieser Wendepunkt eigentlich eingetreten, ob mit Galilei oder Newton oder erst in diesem Jahrhundert, darüber giebt er sich wohl meist keine Rechenschaft. Dem gegenüber aber zeigt das Studium jedes älteren Werkes, wenn es nur auf die fundamentalen Anschauungen eingeht, dass die Entwickelung der Wissenschaft eine immerwährend fortschreitende ist, die auch in diesem Jahrhundert das Aussehen derselben noch stetig verändert hat.

Fechner polemisirt bei der Untersuchung des Begriffsverhältnisses von Kraft und Materie vor Allem gegen die dynamische Auffassung der Materie, die, von Kant ausgehend, die Materie durch einen Conflict entgegengesetzter Kräfte, der attractiven und repulsiven, construiren möchte. „Die Physik, sagt er, braucht Centra für die Kraft, die nicht selbst als Kraft fassbar sein können, und es ist ein Bedürfniss, diesen Unterschied von Materie und Kraft statt zu verwischen auf eine klare Bedeutung zurückzuführen. Dies hat die dynamische Ansicht bisher nicht so vermocht, dass die Physik davon Gebrauch zu machen vermöchte, dass Uebereinstimmung unter den Philosophen selbst und ein Zusammenhang mit dem lebendigen Sprachgebrauche erzielt worden wäre." Trotzdem aber bleibt doch auch bei Fechner der Begriff der Kraft in sich derselbe, wie er in der Newton'schen Schule und danach auch von den Dynamikern unter den Philosophen gefasst wurde. Zwar versucht Fechner auf Newton's vorsichtigere Anschauung direct zurückzugehen und den nachfolgenden Dogmatismus seiner Schüler zu vermeiden. Er definirt die Kraft nicht, wie die letzteren, als eine unvermittelte

Wirkung der Materie in die Ferne; er sucht vielmehr, wie Newton, die Kraft nur durch die gesetzmässigen Bewegungen der Körper zu oder von einander zu fassen. „Die Kraft ruht, so drückt er sich aus, in einem gesetzlichen Bezuge von Materien.“ „Kraft ist der Physik überhaupt weiter nichts als ein Hülfsausdruck zur Darstellung der Gesetze des Gleichgewichts und der Bewegung, welche beim Gegenüber von Materie und Materie gelten. Sonne und Erde äussern eine Anziehungskraft auf einander, heisst nichts weiter, als: Sonne und Erde bewegen sich im Gegenüber gesetzlich nach einander hin; nichts als das Gesetz kennt der Physiker von der Kraft; durch nichts sonst weiss er sie zu charakterisiren.“ Indessen ist diese Anschauung bei Fechner doch nur wenig in den Vordergrund gerückt, und an den meisten Stellen, wie das auch natürlich ist, bleiben einfach die gäng- und gäben Vorstellungen. Fechner nennt es eine von einer gründlichen physikalischen Auffassung weit abführende Vorstellung, die Kraft nach Art des Lichts von gegebenen Punkten aus sich ausbreitend zu denken. „Unstreitig kommt die Abnahme der Gravitationskraft, elektrischen, magnetischen Kraft nach dem reciproken Quadrat der Entfernungen dieser Vorstellung nicht nur ungemein zu statten, sondern ist auch die hauptsächlichste Stütze derselben. Aber die Kraft braucht keine Zeit, sich fortzupflanzen, weil das Gesetz keine braucht, das Licht braucht Zeit dazu; schon hier hält die Analogie nicht Stich, auch sonst nicht, und möchte sie selbst noch weiter reichen, als sie reicht, so kann der Physiker factisch nichts von dem, was aus Kräften abzuleiten ist, daraus ableiten, dass ein Etwas sich zwischen gegebenen Materien fortpflanze, sondern Alles, was Kräfte ihm zu leisten haben, nur aus Gesetzen der Bewegung der Materien, zwischen denen sich das Etwas fortpflanzt, womit das sich fortpflanzende Etwas zu einem leeren Namen wird, gleichviel auch, ob man diesen Namen durch andere, wie Stoss, Impuls, Antrieb, ersetze.“ Damit kommt er zu Vorstellungen über die Wirksamkeit der Kraft, ganz conform denen, wie sie schon Boscowich und in letzter Zeit Buys-Ballot entwickelten; nur sind ihm die Umänderungen der Kraft in gewissen Punkten durch sich selbst unwahrscheinlich. Er bemüht sich, diese Umkehrungen nicht aus der einen Kraft, sondern aus dem Zusammenwirken mehrerer zu erklären, indem er die Kraft, welche in einer Combination von Punkten wirkt, dem Producte aller irgendwie von Punkt zu Punkt zunehmenden Abstände proportional setzt [1]). Dieses Kraftgesetz schliesst für die Wirk-

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

[1]) Atomenlehre, S. 207: „In jeder Combination aus irgend viel Theilchen waltet eine Kraft, welche ihrer Grösse und Richtung nach durch die Verhältnisse des Zusammenseins aller Theilchen auf einmal bestimmt wird, und die Bedeutung hat, dass ihrer Grösse proportional die Geschwindigkeit aller Theilchen zugleich nach der Richtung, in der sie durch die Kraft getrieben werden, wächst oder abnimmt. Der Grösse nach ist sie reciprok dem Product aus den Quadraten aller Abstände, die sich von je einem Theile zum anderen nehmen

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

samkeit zweier Theilchen das Newton'sche Gesetz ein; da es aber bei seiner Complicirtheit wenig Beobachtung und noch weniger Verarbeitung unter den Physikern gefunden hat, wollen wir nicht näher darauf eingehen.

Fechner unterlässt auch in seinen historischen Bemerkungen, und das ist eine der merkwürdigsten Seiten des ganzen Werkes, die Erwähnung von unzweifelhaften Atomistikern, wenn sie nur ausserhalb des Bereichs der Newton'schen Kräfteanschauung stehen. Ob man Descartes neben Leibnitz als Atomistiker anführen müsste, darüber kann man zweifelhaft sein, obgleich die Zusammensetzung der Descartes'schen Elemente ebenso atomistisch wie die Monadenlehre des Letzteren erscheint. Dass aber in dem Werke, in welchem doch von Boscowich an bis auf die neueste Zeit alle möglichen Zeugen für die Atomistik aufgeführt werden, der Name und das System von Lesage nicht einmal genannt werden, das zeugt für die noch fortdauernde Gebundenheit der Physiker in der damaligen Zeit an die Schranken der Newton'schen Kraftanschauung und lässt erkennen, wie weit man damals im Allgemeinen noch von dem Gedanken entfernt war, alle Elementarkräfte aus dem Bereich des Physikers zu verbannen, und wie sehr man im Allgemeinen noch die Absicht von sich wies, nur die Bewegungen und diese allein ohne Bezug auf hypothetische Elementarkräfte in der Physik zu betrachten. Und dem ganz entsprechend ist wohl zu bemerken, dass auch das Gesetz von der Erhaltung der Kraft in dem Werke, trotzdem es ja einige Male erwähnt wird, doch nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Fechner's Atomentheorie zeigt in mancher Beziehung ein doppeltes Angesicht; sie schliesst ab in Bezug auf die Constitution der Materie und bleibt da auch für uns noch maassgebend, gehört aber in Bezug auf ihre Anschauung von der Kraft ganz der alten Schule an und hat den sich schon zeigenden Spuren anderer Anschauungen keine Berücksichtigung angedeihen lassen. Sehr eingehend dagegen beschäftigt sich Fechner wieder im letzten philosophischen Theile seiner Arbeit mit der letzten Constitution der Atome, über die gerade damals zahlreichere Abhandlungen erschienen. Er entschied sich dafür, die Atome für einfache Wesen zu nehmen, „die nur noch einen Ort, aber keine Ausdehnung

---

lassen. Der Richtung nach treibt sie die Theilchen als anziehende Kraft gegen den gemeinsamen Schwerpunkt oder als abstossende vom gemeinsamen Schwerpunkt weg, je nachdem jenes Product negativ oder positiv ausfällt. Die Vertheilung der Wirkung dieser Kraft auf die einzelnen Theilchen, d. h. die Bewegung der einzelnen Theilchen vermöge dieser Kraft, erfolgt so, dass das Princip der Erhaltung des Schwerpunktes dabei besteht, wonach sie, von der Ruhe ab gerechnet, dem Schwerpunkte mit Geschwindigkeiten zustreben oder von demselben mit Geschwindigkeiten wegstreben, welche ihrem Abstande vom Schwerpunkte direct proportional sind."

mehr haben, indess sie durch ihre Distanz verstatten, dass die aus ihnen bestehenden Systeme noch solche haben". „Man mag die einfachen Wesen, sagt er, materielle Punkte, Kraftmittelpunkte, punktuelle Intensitäten, substantielle Einheiten, einfache Realen, Monaden nennen, der Name ist gleichgültig. Ihre Natur, Bedeutung, Begriff, Verwendung und Verwerthung aber bestimmt sich dadurch und eben nur dadurch, dass sie als Grenze der Zerlegung des aufzeigbaren und mit aufzeigbaren Eigenschaften begabten, objectiv (sinnlich äusserlich) erfasslichen realen Rauminhalts auftreten. Nur in solcher Beziehung zum erfahrungsmässig Gegebenen sind sie zu definiren, hiernach sind sie vorzustellen, als Punkte nicht hinter oder ausser Zeit und Raum, nur mit Bedacht, dass, wie klein man diese Punkte vorstellen will, es immer noch nicht reicht." Für diese einfache Atomistik führt Fechner auch an, dass schon vor ihm viele achtungswerthe Physiker und Mathematiker besonders des Auslandes, wie Boscowich, Ampère, Cauchy, Séguin, Moigno, St. Venant u. A., die Existenz einfacher Atome behauptet hätten, dass zwar in Deutschland die Möglichkeit solcher Atome bis jetzt immer nur beiläufig statuirt worden sei, dass aber W. Weber, Helmholtz, R. Hoppe u. A. dieser Anschauung doch wenigstens geneigt erschienen. Selbst von den Philosophen seien alle diejenigen der einfachen Atomistik günstig, welche sich der Leibnitz'schen Monadologie anschlössen, und Männer wie Lotze [1]), Max Drossbach [2]), Herm. Langenbeck [3]), und J. H. Fichte [4]) hätten sich ausdrücklich für diese Art der Atomistik ausgesprochen. Indessen ist hierzu doch zu bemerken, dass diese Philosophen, wie schon die Titel ihrer Schriften andeuten, sich nur aus psychologischem Interesse und zu Gunsten der Demonstration der Seele als einer einfachen, unvergänglichen Monade der Atomistik angeschlossen haben [5]) und dass

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

---

[1]) Mikrokosmus I. Bd., Leipzig 1856.

[2]) Die Harmonie der Ergebnisse der Naturforschung mit den Forderungen des Gemüthes oder die persönliche Unsterblichkeit als Folge der atomistischen Verfassung der Natur, Leipzig 1858. Die Genesis des Bewusstseins nach atomistischen Principien, Leipzig 1860.

[3]) Ueber Atom und Monade, Hannover 1858.

[4]) Anthropologie, 2. Aufl., 1860.

[5]) Auch Fechner geht schliesslich in seiner Atomistik nur in anderer Weise auf das psychologische Gebiet über. Er macht gegen die monadologische Definition der Seele geltend, dass diese die Unsterblichkeit der Seele nicht beweisen könne, weil sie ja die Einfachheit der Seele erst ad hoc annehme. Er stellt seine Ansicht von der Seele jener monadologischen als die synechologische gegenüber. „Sie unterscheidet sich darin wesentlich von der monadologischen Ansicht, dass sie, anstatt die psychische Einheit an die einzelnen Atome zu knüpfen und mithin ebenso viel (bewusste oder unbewusste) Seelen in der Welt zu sehen, als metaphysisch- oder physisch-discrete einfache Körperatome vorhanden sind, vielmehr die psychische Einheit in höchster und letzter Instanz an den gesetzlichen Zusammenhang der Weltatome knüpft (Gott), untergeordnete psychische Einheiten (Seelen der Thiere und Menschen) aber an untergeordnete Theilsysteme dieses ganzen Systems" (S. 249). Nach dieser Ansicht, die ganz an Fechner's Anschauung vom Wesen der Kraft angelehnt erscheint,

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

die Physiker auch seit jener Zeit mehr und mehr von der Annahme einer Zusammensetzung der Materie aus immateriellen Elementen zurückgekommen sind.

Wie die Arbeiten der erwähnten Philosophen geht auch Rob. Grassmann's Werk „Die Lebenslehre oder die Biologie" (Stettin 1862) im letzten Ziele auf die Erklärung der belebten Natur, ruht aber trotzdem auf ganz physikalischer Grundlage[1]). Nach ihm besteht jeder Körper aus letzten Theilen, „welche sich nicht mehr in kleinere Theile derselben Art zerlegen lassen". Da diese Theile auch bei unseren Grundstoffen noch zerlegbar sein können, so schlägt Grassmann für dieselben den Namen Korn statt des gebräuchlichen Namens Atom vor. Jedes einfache, nicht zusammengesetzte Korn unterscheidet sich nur dadurch von einem Raumpunkte, dass ihm Kräfte innewohnen. Ein zusammengesetztes Korn kann aber mehrere Kraftpunkte haben, die verschieden gelagert sind und auch verschiedenes Gewicht besitzen.

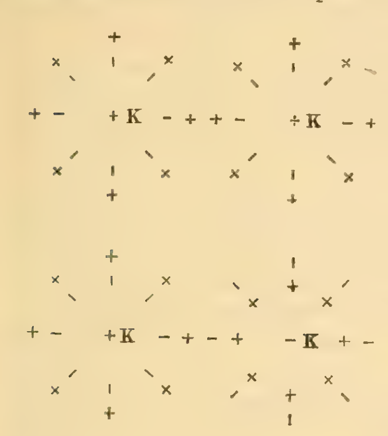
Alle Kräfte wirken nach dem umgekehrt quadratischen Verhältniss der Entfernung und sind theils Anziehungs-, theils Abstossungskräfte. Nach der Art dieser Kräfte muss man auch zweierlei Arten von Kraftpunkten unterscheiden. Solche Kraftpunkte, die nur anziehende Kräfte besitzen, heissen Körperpunkte und bilden das Fundament der ponderablen Materie. Neben diesen aber existiren auch Kraftpunkte, die anziehende und abstossende Kräfte zugleich ausüben. Diese Kraftpunkte, welche Grassmann Epunkte nennt, sind in sich wieder in zwei Gruppen getheilt, so dass die Epunkte einer und derselben Gruppe sich gegenseitig abstossen, diejenigen verschiedener Gruppen aber anziehen; sie werden danach als positive oder Erpunkte und negative oder Siepunkte unterschieden. Die Kraft der Körperpunkte heisst Gravitation, die der Epunkte Ekraft (oder Elektricität). Die Epunkte kommen nur paarweise vor, und zwar so, dass immer zwei nach Art der Doppelsterne einander umkreisende, entgegengesetzte Epunkte zu einem Epaare vereinigt sind. Die Epaare üben auf grössere Entfernungen hin, da ihre entgegengesetzten Kräfte sich neutralisiren, auf die Körperpunkte weder anziehende noch abstossende Kräfte aus, sie sind also imponderabel und bilden die Masse des Weltäthers. Auf moleculare Entfernungen hin wirken

---

ist das wache Bewusstsein nicht mit dem Wesen der Atome an sich, sondern mit deren Bewegungszustande nach Gesetzen verbunden, in die man bis zu gewissen Grenzen erfahrungsmässig eindringen kann. Eines der fundamentalsten dieser Gesetze hat er schon in den „Elementen der Psychophysik" (Leipzig 1860) entwickelt, das Gesetz vom Schwellenwerth der Empfindung, nach dem keine Bewegung, die ein Bewusstseinsphänomen mitzuführen vermag, dies anders vollbringen kann, als, indem sie einen gewissen Grad der Lebhaftigkeit oder Stärke, die sogenannte Schwelle, überschreitet.

[1]) Robert Grassmann, Bruder von Hermann Günther Grassmann, Buchhändler in Stettin.

aber auch die Körperpunkte und die Epaare auf einander ein, und zwar so, dass jeder Körperpunkt den einen Epunkt (den näheren) stärker anzieht und den anderen schwächer abstösst und dass also zwischen den Körperpunkten und den Epaaren immer eine Anziehungskraft übrig bleibt. Die Körner (Atome) bestehen danach aus einem Körperpunkte und einer darum gelagerten Atmosphäre von lauter homolog gerichteten Epaaren. Da nun in ihrem Verhältniss zu den Epunkten auch die Körperpunkte von zweierlei Art sind und entweder von den positiven oder von den negativen Epunkten angezogen oder abgestossen werden, so muss man auch noch positive und negative Körner unterscheiden, deren äusserste Schicht entweder von positiven oder negativen Epunkten gebildet wird (S. d. Fig.). Epaare stossen sich ab oder ziehen sich an, je nach ihrer Lage, im umgekehrt biquadratischen, Körperpunkte ziehen sich nur nach dem umgekehrt einfach quadratischen Verhältniss der Entfernung an. Da nun bei der Wechselwirkung von Körnern auf kleine Entfernungen hin die Atmosphären derselben sich beträchtlich näher sind als die Kerne, so folgt, dass bei gleichartigen Körnern mit der Annäherung die Abstossungskraft der gleich gerichteten atmosphärischen Epaare viel stärker wachsen muss als die Anziehungskraft der Körperpunkte und dass dadurch eine gewisse Gleichgewichtslage der Körner bedingt wird.




Die durch die Anziehung der entgegengesetzt gerichteten Epaare verstärkte Anziehung, welche zwischen ungleichartigen Körnern stattfindet, heisst chemische Verwandtschaft. Bei grösster Annäherung, bei der Berührung oder Reibung tauschen ungleichartige Körner ihre Epunkte so aus, dass die negativen auf dem einen, die positiven auf dem anderen Kern sich anhäufen, wodurch die besonderen Ekräfte (oder Elektricitäten) frei werden. Wie gleichartige oder ungleichartige Körner, so ziehen sich auch Eströme (Aetherströme) an oder stossen sich ab, je nachdem sie gleich oder entgegengesetzt gerichtet sind. Der Magnetismus entsteht dadurch, dass in den Körnern die Epunkte den Schwerpunkt der Körperpunkte umkreisen. Die Wärme besteht aus Schwingungen der ganzen Körner, das Licht in Schwingungen der Epaare.

Grassmann versucht, wie man sieht, in noch grösserer Schärfe als Fechner die Atomistik ganz dynamisch zu fassen und alle Materien in Kräfte aufzulösen, muss dafür aber die mannichfaltigsten Kräfte in einem

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Punkte concentriren. Ein positiver Körperpunkt zieht den negativen Epunkt an, stösst den positiven ab und wirkt dabei noch attractiv auf jeden anderen Körperpunkt, gleichgültig, ob derselbe sich gegen die Epunkte ganz gleich oder auch entgegengesetzt verhält. Die Nothwendigkeit einer so complicirten Maschinerie von Wirkungen, die noch dazu von einem Punkte ausgehen, der absolut keine anschauliche Bestimmung in sich enthält, ja der einer jeden solchen Bestimmung absolut unfähig ist, war kein verlockendes Moment für die dynamische Atomistik und liess eher das Verlangen nach einer kinetischen Atomistik wach werden, die denn auch, je mehr man sich mit der mechanischen Theorie der Wärme beschäftigte, immer näher rückte [1]).

Einen Wendepunkt in dieser Beziehung deutete schon Wilhelmy's „Versuch einer mathematisch-physikalischen Wärmetheorie“ vom Jahre 1851 an. Wilhelmy [2]) behielt die Vertheilung der anziehenden und abstossenden Kräfte auf zwei verschiedene Materien bei, betonte aber mehr als die dynamischen Atomistiker den Einfluss der Zusammensetzung der körperlichen Theilchen und den Einfluss aller benachbarten auf die Wirkungsart der Kräfte. „Wir verstehen, so heisst es in seiner Abhandlung, unter Materie den Inbegriff alles im Raume Existirenden. Die Materie existirt aber nur, indem sie eine Wirkung ausübt, und zwar kann diese Wirkung nur eine gegenseitige zwischen ihren Theilen sein... Da die Materie nicht vermehrt oder vermindert werden kann, so ist zwischen den Theilen derselben keine andere gegenseitige Einwirkung möglich als eine solche, die zu Ortsveränderungen disponirt . . . Da nun die relative Ortsveränderung der Punkte nur von doppelter Art sein kann, nämlich eine die gegenseitige Entfernung vermehrende oder vermindernde, so sind auch nur zwei Classen von Elementen der Materie möglich: sich gegenseitig abstossende und anziehende. Es müssen also als die Materie constituirend zweierlei Kraftpunkte, abstossende (Aetheratome) und anziehende (Massenatome), angenommen werden . . . Die Materie existirt aber nicht in ihrer Abstraction, sondern nur als bestimmte Materie . . . Die Elemente dieser qualitativ, d. h. chemisch bestimmten Materie nennt man Molecüle. Sie verdanken das verschiedene Maass ihres Wirkungsvermögens der Verschiedenheit ihrer Zusammensetzung; es sind nämlich Massenatome mit Aetheratomen zu Molecülen aggregirt, als solche ein

---

[1]) Selbst Grassmann gebraucht trotz der vielfältigen Kräfte noch ein kinetisches Moment zur Constitution der Epaare, deren Punkte vermöge ihrer Anziehungskräfte zusammenstürzen müssten, wenn sie nicht wie planetarische Körper oder wie Doppelsterne durch die Kraft ihrer Bewegung in ihren Bahnen erhalten würden.

[2]) Ludw. Ferd. Wilhelmy (25. December 1812 Stargard — 18. Februar 1864 Berlin), zuerst Apotheker in Stargard, dann Privatdocent in Heidelberg, seit 1854 Privatgelehrter in Berlin.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

durch das Verhältniss seiner Zusammensetzung aus anziehenden und abstossenden Kraftpunkten qualitativ (chemisch) bestimmtes Ganzes bildend. Diese Molecüle sind in einem Medium, dem Aether, vertheilt, welches nur aus abstossenden Kraftpunkten gebildet ist; sonach können wir das Molecül betrachten als eine von Aether umgebene und durchdrungene Constellation von Massenatomen . . . Man kann die ganze Kraftwirkung eines solchen Atomensystems, d. h. eines Molecüls, als von dem Mittelpunkte der darin wirksamen Kräfte ausgehend, die Molecularcentra also als Kraftcentra betrachten, denen zugleich anziehende und abstossende Wirkung innewohnt . . . Der Werth der Wirkungsresultante eines Molecüls ist abhängig: 1) von dem Zusammensetzungsverhältniss der integrirenden Kraftpunkte, also von der chemischen Qualität . . . und 2) von der Vertheilung und Anordnung der Kraftpunkte . . . Die Kraftresultante eines Molecüls wirkt auf ein gegenüberstehendes nicht bloss als Ganzes, sondern auch auf dessen integrirende Atome, demnach induciren die Molecüle einander, d. h. sie bedingen gegenseitig die Abstände der integrirenden Atome vom Mittelpunkte der Kräfte im Molecül . . . Der Werth der Inductionswirkung ist abhängig von der Qualität und dem Abstande der umgebenden Molecüle. Wenn die inducirende Wirkung nach allen Richtungen gleich ist, so ist auch die Vertheilung der Kraftpunkte im Molecül gleichartig, und daher die von demselben ausgehende resultirende Wirkung nach allen Radien gleich gross, dann befindet sich das Molecül im Zustande des elektrischen Gleichgewichts. Wird aber die Gleichartigkeit der Begrenzung in irgend einer Weise aufgehoben, so wird die Vertheilung der Kraftpunkte im Molecül ungleichartig, das Molecül wird ungleichartig inducirt oder polarisirt, die beiden Elektricitäten werden auf demselben frei, wie man sich auszudrücken pflegt. Ein Molecül kann auf dreierlei Weise polarisirt werden: 1) mechanisch: indem ihm auf derselben Richtungslinie gleichartige, aber ungleich entfernte Molecüle gegenüberstehen; 2) chemisch: indem ihm auf derselben Richtungslinie qualitativ ungleichartige Molecüle gegenüberstehen; 3) elektrisch: indem ihm auf derselben Richtungslinie elektrisch ungleichartige Molecüle gegenüberstehen . . . Die Molecüle sind vermöge der Kräfte, mit denen sie sich gegenseitig afficiren, in fortwährender Bewegung, indem sie um eine Ruhelage schwingen. Eine tiefer eingehende Betrachtung sollte auch die Bewegungen im Molecül, die Schwingungen der Atome, berücksichtigen, welche in Folge der veränderten Induction entstehen müssen; man hat sich aber bisher mit einer ersten Annäherung begnügt, indem man nur auf die Ortsveränderungen der Molecularcentra Rücksicht nahm. Die Körper existiren im Raume nur durch die Bewegung ihrer Molecüle. Der Schöpfungsmoment trat da ein, als auf die freilich durch diesen Act erst geschaffene Materie (da Materie ohne Kraft nicht gedacht werden kann) die dieser Bewegung

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

äquivalente Kraftsumme übertragen wurde, welche sich nun in einem ewigen Kreislauf, bald in der einen, bald in der anderen Form auftretend, durch alles Materielle hindurch fortpflanzt [1])."

Nach diesen allgemeinen Betrachtungen geht Wilhelmy zu den Anwendungen derselben auf die Wärmetheorie über, denen er die folgenden Definitionen zu Grunde legt. „Unter Wärme versteht man einen von der Schwingungsgeschwindigkeit der Molecüle abhängigen Effect. Die absolute Wärme eines Molecüls ist proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit, mit welcher es durch die Ruhelage geht. Die Temperatur eines Körpers ist proportional oder gleich der lebendigen Kraft seiner schwingenden Molecüle . . . Temperaturerhöhung tritt ein, wenn durch Uebertragung lebendiger Kraft die in den Molecülen des Körpers bereits wirksame vermehrt wird." Wir wollen indessen auf die mathematische Ableitung der empirischen Gesetze aus den vorhergegangenen allgemeinen nicht weiter eingehen, da sie keine directen Folgen gehabt und kaum weitere Früchte getragen hat. Jedenfalls bleibt Wilhelmy das Verdienst, schon im Anfange der fünfziger Jahre dem Einflusse der molecularen Kräfte die Wirksamkeit der molecularen Bewegungen und Anordnung mindestens zur Seite gestellt und die Materie im Ideal wenigstens statt durch Kräfte durch Bewegungen construirt zu haben. Dass dies aber nicht unbewusst, sondern vielmehr in klarer Erkenntniss der Entwickelungsrichtung der Wissenschaft geschehen, ersieht man aus dem Satze, mit welchem Wilhelmy die Einleitung seines Werkes schliesst: „Sollte es mir gelingen, den Grundgedanken, der hierin liegt, zur Geltung zu bringen, so wäre wiederum ein Schritt zu dem letzten Ziele der Naturwissenschaften gethan, welchem wir uns langsam, doch in neuester Zeit stetig und sehr augenfällig nähern, nämlich zu der Lösung der Aufgabe, alle Vorgänge in der Natur auf Bewegung und alles Ursächliche der Phänomene auf Uebertragung und Erhaltung lebendiger Kraft zurückzuführen [2])."

---

[1]) Vers. einer math.-physik. Wärmetheorie, Heidelberg 1851, S. 7 bis 17.

[2]) Auf ähnlichen principiellen Grundlagen wie Grassmann und Wilhelmy, nur etwas schwächer kinetisch und stärker dynamisch, wenigstens als der letztere, versuchte auch F. Redtenbacher (1809 bis 1863, Director d. Polytechnicums in Carlsruhe) im Jahre 1857 (Das Dynamidensystem, Grundzüge einer mechanischen Physik, Mannheim 1857) die Materie zu construiren. Danach besteht die Materie aus schweren Körperatomen, welche einander in messbaren Entfernungen nach dem Newton'schen Gesetz, in sehr geringen Entfernungen aber in viel schneller wachsendem Verhältniss anziehen, und aus nicht schweren Aetheratomen, die einander abstossen, während zwischen Körperatomen und Aetheratomen anziehende Kräfte wirksam sind. Nimmt man dann die Entfernung zweier Körperatome gegen ihre Dimensionen hinreichend gross und jene Anziehung zwischen Körper- und Aetheratomen hin-

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Indess scheint Wilhelmy nicht geahnt zu haben, dass ein weiterer bedeutender Schritt zu diesem Ziele doch ziemlich nahe lag. Ist nämlich die Wärmebewegung ein Schwingungszustand der Molecüle, der mit der Erhöhung der Temperatur ins Unbegrenzte vergrössert werden kann, so muss nothwendig auch eine Temperatur und damit auch ein Zustand der Materie denkbar sein, bei welchem die Molecüle durch die Wärmebewegungen aus ihren gegenseitigen Wirkungssphären ganz herausgetrieben und somit die Molecularkräfte unwirksam werden. Verschiedene Eigenschaften der Gase aber, vor Allem der gleiche Ausdehnungscoëfficient, die gleiche Volumenwärme u. a. m., liessen schliessen, dass dieser Zustand bei den Gasen schon eingetreten, dass die Molecüle derselben also aufgehört, um eine gewisse Gleichgewichtslage zu oscilliren, und dass sie sich frei von jeder Anziehung und Abstossung der Nachbarmolecüle, also geradlinig durch den Raum bewegen, so lange wenigstens, bis ein directer Zusammenstoss mit anderen Molecülen sie aus dieser Richtung hinauswirft. Joule hatte auch, wie wir schon berichtet, noch im Jahre 1851 diesen Schluss vollendet und sogar für Wasserstoff die Translationsgeschwindigkeit der Molecüle berechnet[1]). In theoretisch zusammenhängender Weise aber wurde diese Hypothese von der freien geradlinigen Bewegung der Gasmolecüle, die mechanische oder kinetische Theorie der Gase, erst von Deutschen, von A. Krönig und R. Clausius, bearbeitet.

A. Krönig betonte in seiner Schrift Grundzüge einer Theorie der Gase vom Jahre 1856[2]) die Thatsache, dass man wohl allgemein nun die Wärme als eine reine Bewegungserscheinung betrachte, dass es aber an einer klaren Anschauung von der Art dieser Bewegung noch durchaus fehle, und deshalb versprach er, für die gasförmigen Körper wenigstens eine Hypothese darzulegen, die allen Anforderungen der Klarheit und Anschaulichkeit zu entsprechen scheine. Nach dieser Hypothese bestehen die Gase aus Atomen, welche sich ganz wie feste, vollkommen elastische Kugeln verhalten und die sich mit gewissen Ge-

---

reichend stark an, so wird sich der Aether atmosphärenartig um die Körperatome lagern, während der Raum zwischen den Aetherhüllen ganz leer bleibt. Solche Körperatome mit Aetheratmosphären heissen nun Dynamide. Zwischen heterogenen Körperatomen finden noch besondere chemische Anziehungskräfte statt, vermöge deren sich mehrere einfache Dynamide zu einem zusammengesetzten vereinigen, welches dann eine gemeinsame Aetherhülle hat. Durch die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Dynamiden können die Kerne wie auch die Hüllen derselben in schwingende und rotirende Bewegungen gerathen, die sich als Schall, Licht, Wärme und Elektricität manifestiren. Die Wärmeschwingungen sind wahrscheinlich Radialschwingungen, weil dieselben die Materie ausdehnen. Die elektrischen und magnetischen Erscheinungen, die keine Veränderungen des Volumens bewirken, beruhen wahrscheinlich auf rotatorischen Bewegungen.

[1]) Siehe S. 406 dieses Bandes.

[2]) Auszug in Pogg. Ann. XCIX, S. 315. — August Karl Krönig (20. Sept. 1822 Schildesche, Westphalen — 5. Juni 1879 Berlin), Gymnasiallehrer in Berlin.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

schwindigkeiten innerhalb eines leeren Raumes bewegen. Ein solches Gasatom oscillirt nicht um eine gewisse Gleichgewichtslage, sondern bewegt sich in gerader Linie und mit constanter Geschwindigkeit so lange fort, bis es gegen ein anderes Gasatom oder gegen eine feste oder flüssige Wand stösst, die sich solchen Stössen gegenüber ebenfalls vollkommen elastisch verhalten. Anders als bei der Berührung in unmessbarer Entfernung findet keine Wechselwirkung zwischen den Gasatomen statt[1]). Um aus diesen Annahmen die mechanischen Gesetze der Gase abzuleiten, denkt sich Krönig ein rechtwinklig-parallelepipedisches Gefäss mit den Kanten $x$, $y$ und $z$, in dem sich die gleich grossen Atome mit gleichen Geschwindigkeiten (der Einfachheit wegen) nur nach drei Richtungen, nämlich parallel den Kanten des Gefässes, bewegen. Bezeichnet man dann mit $m$ die Masse eines Atoms, mit $c$ die Geschwindigkeit desselben und mit $a$ die Anzahl der von ihm in einer Secunde auf eine Wand ausgeübten Stösse, so ist der von diesen Stössen herrührende Druck $p = mca$. Da aber ein Atom nicht eher die eine Wand wieder treffen kann, als bis es von der entgegengesetzten abermals nach der ersten zurückgeworfen, so muss $a = \frac{c}{2x}$ und $p = mc \cdot \frac{c}{2x}$ sein, wenn das Atom der Kante $x$ sich parallel bewegt. Bezeichnet man dann noch die Anzahl aller in dem Gefässe vorhandenen Atome mit $n$, so bewegen sich unter Annahme einer gleichmässigen Vertheilung der Geschwindigkeiten $\frac{n}{3}$ der Atome parallel der Kante $x$ und senkrecht gegen die Wand $yz$, und der auf diese Wand dadurch ausgeübte Druck ist $p = mc \cdot \frac{c}{2x} \cdot \frac{n}{3}$. Für die Flächeneinheit giebt dies den Druck $p = mc \cdot \frac{c}{2x} \cdot \frac{n}{3} \cdot \frac{1}{yz}$ oder, wenn wir den Inhalt des Gefässes $xyz$ mit $v$ bezeichnen, auch $p = \frac{nmc^2}{6} \cdot \frac{1}{v}$. Das System der Atome folgt also dem Mariotte'schen Gesetz. Da die lebendige Kraft $mc^2$ der absoluten Temperatur proportional ist, so kann man jener Gleichung auch die Form $pv = const.n.t$ geben und damit ist auch das Gay-Lussac'sche Gesetz für das Atomsystem als gültig nachgewiesen. Setzt man endlich für verschiedene Gase $p_1 = p_2$, $t_1 = t_2$ und $v_1 = v_2$, so folgt $n_1 = n_2$, womit noch das Avogadro'sche Gesetz bestätigt ist. In ähnlicher Weise zeigt Krönig weiter, dass auch nach seiner Hypothese

[1]) Doch behielt Krönig die allerdings nur in den Molecularentfernungen bei festen und flüssigen Körpern wirksamen anziehenden und abstossenden Kräfte der Materie noch bei und polemisirte 1864 ausdrücklich gegen S. Šubic (Prof. in Graz), der in seiner Schrift „Grundzüge einer Molecularphysik" (Wien 1862) die Annahme von abstossenden neben anziehenden Molecularkräften als einen inneren Widerspruch enthaltend abwies. (Pogg. Ann. CXXIII, S. 299.)

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

der Druck eines Gases auf die Oberfläche der Erde nicht seiner Temperatur, sondern wie bei jedem anderen Körper seiner Masse und der Gravitationsbeschleunigung proportional und dass die Volumenwärme für alle Gase constant sein muss; ebenso gelingt es ihm, die Abweichungen vom Mariotte'schen und Gay-Lussac-Dalton'schen Gesetz, welche sich bei den meisten Gasen zeigen, aus der gegenseitigen Einwirkung der Atome bei ihren Zusammenstössen abzuleiten. Der Schluss der Abhandlung beschäftigt sich mit der Uebertragung der Bewegung von den Atomen auf ganze Massen und also mit der Transformation der Wärme in Arbeit und umgekehrt.

Die Arbeit von Krönig veranlasste auch Clausius, mit seinen Anschauungen über die Wärmebewegung hervorzutreten, Anschauungen, die er, wie er selbst sagt, schon seit dem Erscheinen seiner ersten Arbeit von 1850 sich gebildet, deren Veröffentlichung er aber bis jetzt unterlassen, weil ihm dieselben noch nicht vollendet genug erschienen waren. In der berühmten Abhandlung „Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen“ [1]) schloss er sich ganz an Krönig insofern an, als er in vollkommenen Gasen den freien Molecülen derselben nur eine Translationsbewegung zuschrieb, machte aber gleich darauf aufmerksam, dass die existirenden Gase sich diesem idealen Zustande nur mehr oder weniger annähern könnten. Selbst für die einfachen, permanenten Gase berechnete er in den mathematischen Zusätzen zu seiner Abhandlung die lebendige Kraft der fortschreitenden Bewegung der Molecüle nur zu 0,6315 der gesammten in den Gasen enthaltenen Wärmemenge. Er hielt dafür, dass diese Abweichungen vom vollkommenen Gaszustande herrühren könnten sowohl von rotirenden Bewegungen der Gasmolecüle als auch von Vibrationsbewegungen innerhalb der letzteren selbst [2]); er hatte auch versucht, nach den von Regnault beobachteten Abweichungen der Gase vom Mariotte'schen Gesetz diese Bewegungszustände genauer zu bestimmen, hatte aber diese Arbeit schliesslich doch als aussichtslos aufgeben müssen.

Clausius zog also fernerhin nur vollkommene, d. h. solche Gase in Betracht, deren Molecüle nur translatorische Bewegungen zeigen; unter diesem Gesichtspunkte gab er zuerst seine neue, epochemachende

[1]) Pogg. Ann. C, S. 353.

[2]) Clausius sagt (Pogg. Ann. C, S. 354): „Zunächst liegt es nahe, neben der fortschreitenden Bewegung auch eine rotirende Bewegung der Molecüle anzunehmen, da bei jedem Stosse zweier Körper gegen einander, wenn er nicht zufällig central und gerade ist, ausser der fortschreitenden auch eine rotirende Bewegung entsteht. Ferner glaube ich, dass innerhalb der einzelnen, in fortschreitender Bewegung begriffenen Massen auch eine Vibration stattfindet . . . Selbst wenn man sich auf die Betrachtung der Massenatome allein beschränkt, und diese als absolut starr ansieht, so bleibt es doch möglich, dass ein Molecül, welches aus mehreren Atomen besteht, nicht ebenfalls eine starre Masse bildet, sondern dass in ihm die einzelnen Atome innerhalb gewisser Grenzen beweglich sind und daher gegen einander schwingen können.“

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Theorie der Uebergänge der Aggregatzustände in einander. Im festen Zustande vibriren die Theilchen um gewisse stabile Gleichgewichtslagen. Im flüssigen Zustande ist eine solche Gleichgewichtslage nicht mehr vorhanden, so dass ein Molecül nicht mehr an bestimmten Nachbarmolecülen haftet, sondern dieselben unter Einwirkung der Kräfte von anderen Molecülen verlässt; doch ist die fortschreitende Bewegung noch nicht so stark, dass die Molecüle ganz aus der Wirkungssphäre der anderen Molecüle kommen könnten. Das gilt aber nur für den Mittelzustand; an der Oberfläche werden günstige Fälle eintreten, wo ein Molecül so stark fortgeschleudert wird, dass es ganz aus der Wirkungssphäre der anderen kommt und geradlinig weitergeht. Ist der Raum über der Flüssigkeit begrenzt, so wird derselbe sich nach und nach mit solchen Molecülen füllen, und dann wird manches von den freien Molecülen auch wieder in die Anziehungssphäre der Flüssigkeit kommen und wieder in den Flüssigkeitszustand zurückkehren. Immer aber wird nach Verlauf einer gewissen Zeit ein Gleichgewichtszustand zwischen der Verdampfung und der Condensation eintreten, in welchem man den Raum über der Flüssigkeit mit Dampf gesättigt nennt. Daraus folgt übereinstimmend mit den Thatsachen, dass die Sättigungsdichte mit der Temperatur wachsen, dass bei der Verdampfung Wärme verschwinden, wie bei der Condensation frei werden muss, dass die Gastheilchen nur mit geringerer Geschwindigkeit zurückprallen können und also die Temperatur sinken muss, wenn eine der Wände des Gefässes zurückweicht und von den Dämpfen dabei mechanische Arbeit geleistet wird u. s. w. In Bezug auf den Zusammenhang zwischen Ausdehnung und mechanischer Arbeit ist aber wohl zwischen Dämpfen und vollkommenen Gasen zu unterscheiden. Bei den ersteren ist selbst bei dem Fehlen jeder äusseren Arbeit für jede Ausdehnung (im gasleeren Raume) noch die zwischen den Molecülen wirkende Anziehung zu überwinden und also eine innere Arbeit zu leisten, während vollkommene Gase durch die blosse Beharrungskraft ihrer Molecüle ihr Volumen ändern können, ohne dass dabei die mindeste innere Arbeit gethan wird. Da verschiedene Gase von gleicher Temperatur bei demselben Drucke, auch wenn sie in Verbindung gebracht werden, ihren Bewegungszustand gegenseitig nicht verändern, so ist anzunehmen, dass die einzelnen Molecüle aller Gase in Bezug auf ihre fortschreitende Bewegung gleiche lebendige Kraft haben. Dafür aber ist nach Clausius noch der andere, in der Physik wie in der Chemie gleich wichtig gewordene Schluss zu ziehen, dass auch in den chemisch einfachen Stoffen wie in den zusammengesetzten immer mehrere Atome zu einem Molecül vereinigt sind.

Die so fundamentirte kinetische Theorie der Gase war eine durchaus revolutionäre That, die allerdings in der mechanischen Wärmetheorie ihren zureichenden Grund hatte. Sie entriss einen Theil der Materie wenigstens der Wirksamkeit der alten

elementaren Kräfte und führte alle Veränderungen und Vorgänge in den Gasen auf wandelbare, aber in sich ewige Bewegungen zurück. Trotzdem fand die neue Theorie verhältnissmässig wenig principiellen Widerstand, sondern im Gegentheil ziemlich allgemein willige Aufnahme und eifrige und schnelle Fortbildung. Die Ursache für diese auffallende Erscheinung lag jedenfalls darin, dass die neue Theorie im Schutze einer schon anerkannten, mehr und mehr aufblühenden entstand, mehr aber doch noch darin, dass die Urheber derselben das principielle Gebiet gar nicht berührten, dass sie die gewohnten primitiven Kräfte ruhig fortbestehen liessen und nur die Gasmolecüle aus ihren Kreisen entfernten, dass sie ihre Theorie nicht direct weiter verallgemeinerten, nicht auf das ganze Gebiet der Physik ausdehnten, sondern mit derselben auf thermotisches Gebiet, das doch in einer Neuordnung begriffen war, sich vorläufig beschränkten. Endlich aber, und das war physikalisch der zwingendste Grund, sprachen für die neue Gastheorie die schnellen Erfolge, welche dieselbe in der Lösung ihrer nächsten Aufgaben, der Ermittelung der Geschwindigkeit der Molecüle, ihrer mittleren Wellenlänge u. s. w., erzielte, und die Uebereinstimmung, welche ihre Folgerungen mit den Ergebnissen experimenteller Messungen zeigten [1].

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Wir haben gesehen, dass Joule schon 1851 wenigstens für Wasserstoff die Geschwindigkeit der Molecüle bei einer gewissen Temperatur berechnet hatte. Allgemeiner beschäftigte sich Clausius in den mathematischen Zusätzen zu seiner Abhandlung von 1857 mit demselben Probleme. Wie Joule berechnete auch Clausius nur eine mittlere Geschwindigkeit der Molecüle und nahm zu dem Zwecke an, dass alle Molecüle eines Gases mit derselben Geschwindigkeit sich bewegen, obgleich diese Annahme in Wirklichkeit wohl nicht zutrifft. Ausserdem vernachlässigte er noch die Zusammenstösse der Molecüle, weil bei der Voraussetzung der vollkommenen Elasticität der Molecüle die Geschwindigkeiten durch die Stösse nicht verändert werden und ein Molecül dabei immer nur die Bewegung des anderen aufnimmt. Setzen wir nun die senkrechte Entfernung zweier gegenüberstehenden

[1] Dass dabei trotzdem einzelne, auch bedeutende Physiker noch Gegner der kinetischen Theorie der Gase blieben, ist bei der Neuheit der principiellen Grundlage derselben wohl nur natürlich. In einem längeren Aufsatze „La notion de force dans la science moderne“ (Revue scientifique (3) XXXVI, p. 129, 1885) polemisirt z. B. der eifrige, erfolgreiche Förderer der Wärmetheorie, G. A. Hirn, in neuester Zeit noch mit alter Heftigkeit gegen die mechanische Theorie der Gase. Clausius hat aber seine Einwürfe bald darauf wieder zurückgewiesen. (Bull. de l'Acad. Belg. (3) XI, p. 173, 1886; Beibl. zu Wiedem. Ann. XI, S. 218.) Ueber das Hauptwerk Hirn's: Exposition analytique et expérimentale de théorie mécanique de la chaleur (Paris et Colmar 1862), das vor Allem seiner experimentellen Grundlagen wegen sehr werthvoll ist, sagte Jochmann sehr charakteristisch (Die Fortschritte der Physik im Jahre 1862, S. 299): „In hohem Grade wird ferner die klare Auffassung der Principien durch die Absicht des Verfassers beeinträchtigt, jede hypothetische Ansicht über das Wesen der Wärme zu vermeiden.“

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Wände eines Gefässes gleich $h$ und bildet die Richtung eines Molecüls mit dieser Entfernung einen Winkel gleich $\vartheta$, so ist die Länge des Weges von einer Wand zur anderen $\frac{h}{\cos\vartheta}$, und die Anzahl der Stösse des Molecüls gegen jede der Wände in einer Secunde wird gleich $\frac{u\cos\vartheta}{2h}$ sein, wenn $u$ die Geschwindigkeit des Molecüls bezeichnet. Macht man dann weiter noch die erlaubte Annahme, dass alle möglichen Bewegungsrichtungen unter den einzelnen Molecülen gleich oft vorkommen, so verhält sich die Anzahl der Molecüle, deren Richtungen zwischen den Winkeln $\vartheta$ und $\vartheta + d\vartheta$ liegen, zur Anzahl $n$ aller vorhandenen Molecüle, wie der Flächeninhalt einer Kugelzone, deren Grenzkreise den Winkeln $\vartheta$ und $\vartheta + d\vartheta$ entsprechen, zum Flächeninhalt der Halbkugel. Die Anzahl der dem Winkelintervall $\vartheta$ bis $d\vartheta$ entsprechenden Molecüle ist dann $n \sin\vartheta\, d\vartheta$ und die Anzahl der von ihnen herrührenden Stösse $\frac{nu}{2h}\cos\vartheta\sin\vartheta\, d\vartheta$. Die Wirkung der Wand auf ein Molecül besteht aber nach den Gesetzen des elastischen Stosses darin, dass sie demselben die Geschwindigkeit $u\cos\vartheta$ entzieht und dafür dieselbe Geschwindigkeit im entgegengesetzten Sinne wiedergiebt, oder dass sie dem Molecül in letzterer Richtung die Geschwindigkeit $2u\cos\vartheta$ neu ertheilt. Bezeichnen wir die Masse eines Molecüls mit $m$, so ist die demselben dadurch mitgetheilte Bewegungsmenge $2mu\cos\vartheta$ und die den gesammten Molecülen im Winkelintervall $\vartheta + d\vartheta$ in einer Secunde mitgetheilte Quantität der Bewegung also $\frac{nmu^2}{h}\cos^2\vartheta\sin\vartheta\, d\vartheta$. Integriren wir hier von $\vartheta = 0$ bis $\vartheta = \frac{\pi}{2}$, so erhalten wir die von der Wand dem ganzen Gas mitgetheilte Bewegungsmenge $\frac{nmu^2}{3h}$. Da die in der Zeiteinheit mitgetheilte Bewegungsmenge ein Maass der Kraft ist, so giebt jener Ausdruck zugleich die Kraftwirkung der Wand auf das Gas oder, weil Wirkung und Gegenwirkung gleich sind, auch den Druck des Gases auf die Wand an. Bezeichnet man also den Flächeninhalt der Wand mit $\alpha$ und den Rauminhalt des rechtwinklig-parallelepipedisch gedachten Gefässes mit $v$, so ist der Druck des Gases auf die Flächeneinheit der Wand $p = \frac{nmu^2}{3\alpha h}$ oder $p = \frac{nmu^2}{3v}$. Um aus dieser Formel umgekehrt die Moleculargeschwindigkeit $u$ zu berechnen, setzt man das Gewicht des Gases gleich $q$ und bedenkt, dass $\frac{q}{g} = nm$ ist, dann erhält man für $u$ den Ausdruck $u^2 = \frac{3gpv}{q}$. In diesen Ausdruck sind noch bequemer die Dichte und die Temperatur der Gase einzuführen. Nimmt man Meter und Kilogramm als Einheiten

und denkt sich ein Kilogramm eines Gases unter Atmosphärendruck, so ist $p = 10\,333$, $q = 1$ und $v = \frac{0{,}7733}{d} \cdot \frac{T}{273}$, wenn für die absolute Temperatur des Gefrierpunktes — 273$^0$ und für das Volumen eines Kilogramms Luft unter Atmosphärendruck und bei der Temperatur des Gefrierpunktes 0,7733 cbm gesetzt, die Dichte des Gases bei 0$^0$ aber mit $d$ und die absolute Temperatur mit $T$ bezeichnet wird. Führt man dann noch für $g$ den Werth 9,80886 ein, so erhält man für die Geschwindigkeit der Molecüle eines Gases bei der absoluten Temperatur $T$ den Ausdruck $u = 485 \sqrt{\frac{T}{273\,d}}$ und daraus folgen für die Moleculargeschwindigkeiten des Sauerstoffs, Stickstoffs und Wasserstoffs bei der Temperatur des Gefrierpunktes resp. die Werthe 461 m, 492 m und 1844 m [1]). Diese Ableitung der Moleculargeschwindigkeiten der Gase enthielt in sich eine weitere Aufgabe. Die berechnete Geschwindigkeit der Gasmolecüle ist eine mittlere, unter der Voraussetzung bestimmte, dass der Druck in dem Gefäss nach allen Richtungen hin derselbe ist. Wie schon bemerkt, darf man indess kaum annehmen, dass diese Bedingung in der Natur jemals erfüllt sein werde, und es fragt sich danach, in wie weit die Geschwindigkeiten der einzelnen Molecüle von dieser mittleren abweichen können. Diese Frage stellte und beantwortete zuerst Cl. Maxwell, der sich direct nach Clausius der mechanischen Wärmetheorie bemächtigte und dieselbe nach der mathematischen Seite hin besonders erfolgreich ausbildete. In einer Abhandlung vom Jahre 1860 [2]) leitete er das nach ihm benannte Gesetz ab, dass die Vertheilung der Molecüle nach ihren Geschwindigkeiten durch genau dieselbe mathematische Formel bestimmt wird, wie die Vertheilung empirischer Beobachtungen nach der Grösse ihrer Fehler, deren Formel in der Theorie der Beobachtungsfehler gegeben ist. Danach sind allerdings auch in einem Gase von ganz gleichmässiger Temperatur noch alle verschiedenen Geschwindigkeiten möglich, die ausserordentlich grossen und kleinen haben jedoch sehr geringe Wahrscheinlichkeit für sich, und die meisten Molecüle bewegen sich mit mittleren Geschwindigkeiten. Die nach diesem Vertheilungsgesetz der Moleculargeschwindigkeiten berechnete mittlere (Durch-

---

[1]) Pogg. Ann. C, S. 370. Der von Joule (S. 406) für Wasserstoff erhaltene Werth 6055 engl. Fuss = 1844,7 m stimmt fast genau mit dem von Clausius gefundenen überein.

[2]) Illustrations of the dynamical theory of gases, Part. I: On the motions and collisions of perfectly elastic spheres, Phil. Mag. (4) XIX, p. 19, 1860. James Clerk Maxwell wurde 1831 zu Middlebie bei Edinburgh geboren, studirte in Edinburgh und Cambridge, wurde 1856 Professor der Physik am Marischall-College in Aberdeen, 1860 am Kings-College in London, lebte seit 1865 als Privatmann, bis er 1871 Professor der Physik in Cambridge wurde, wo er am 5. November 1879 starb.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

schnitts-) Geschwindigkeit ist etwas kleiner als die von Joule und Clausius angegebene, nämlich, wenn man die erstere mit $G$ und die letztere mit $V$ bezeichnet, $G = V\sqrt{\frac{8}{3\pi}}$ [1]. Der Maxwell'sche Beweis für das Vertheilungsgesetz der Moleculargeschwindigkeiten wurde nicht ganz vorwurfsfrei gefunden [2]), weil er auf einem Grundsatz fusste, der selbst noch des Beweises bedurfte, aber das Gesetz selbst hat Stand gehalten. Maxwell hat auch im Jahre 1868 [3]) noch einen anderen Beweis auf anderer Grundlage gegeben, den Boltzmann [4]) noch weiter vervollständigte.

Clausius hatte, da er die Gasmolecüle als absolut elastisch annahm, bei der Berechnung des Druckes der Gase und der Geschwindigkeit der Gasmolecüle die Zusammenstösse der letzteren ohne weiteres vernachlässigen können. Für die Erkenntniss des molecularen Zustandes der Gase aber, wie auch für die Zurückweisung missverständlich gegen die kinetische Theorie der Gase erhobener Einwände, waren gerade diese Zusammenstösse ein äusserst wichtiges Element, und so wandte sich Clausius gleich im folgenden Jahre nach seiner obigen Arbeit zur Bestimmung der mittleren freien Weglänge der Molecüle [5]). Clausius ging auch hier wieder von vereinfachenden Voraussetzungen aus. Er nahm an, dass nur ein Theilchen in einem Raum sich bewege, der unregelmässig, aber in überall gleicher Dichtigkeit mit ruhenden Molecülen erfüllt sei. Als mittleren wahrscheinlichen Weg, den das Theilchen bis zum Zusammenstosse mit einem anderen frei zurücklegen kann, fand er dann den Werth $L = \frac{\lambda^3}{\pi s^2}$, wo $\lambda$ den mittleren Abstand der Nachbarmolecüle und $s$ den Radius ihrer Wirkungssphäre bezeichnet [6]).

---

[1]) O. E. Mayer, kinetische Theorie der Gase, Breslau 1877, S. 43.

[2]) Ibidem, S. 36.

[3]) Phil. Mag. (4) XXXV, p. 129 u. 185.

[4]) Studien über das Gleichgewicht der lebendigen Kraft zwischen bewegten materiellen Punkten, Wiener Sitzungsber. LVIII, 2. Abth., S. 517, 1868. Ueber das Gleichgewicht zwischen mehratomigen Gasmolecülen, Wiener Sitzungsber. LXIII, 2. Abth., S. 397 u. 679, 1871. Wiener Sitzungsber. LXVI, S. 213 u. 274, 1872 u. s. w. Ueber diesen Beweis sind später O. E. Mayer und Boltzmann in eine Polemik gerathen, die Wiener Sitzungsber. LXXVI, 2. Abth., S. 373, 1877 und Wiedem. Ann. VII, S. 317, VIII, S. 653, X, S. 296 nachzusehen ist.

[5]) Mittlere Länge der Wege, welche bei der Molecularbewegung gasförmiger Körper von den Molecülen zurückgelegt werden, Pogg. Ann. CV, S. 239, 1858.

[6]) Unter Wirkungssphäre eines Molecüls versteht Clausius dabei eine um den Schwerpunkt des Molecüls beschriebene Kugel, bis zu deren Oberfläche der Schwerpunkt eines anderen Molecüls sich nähern kann, bevor ein Abprallen dieses Molecüls eintritt. (Pogg. Ann. Erg. VII, S. 243.) Denkt man sich die Molecüle als starre Kugeln, welche nur bis zur Berührung der Oberflächen sich einander nähern können, so muss der Durchmesser eines solchen Molecüls so gross gedacht werden, als der Radius der Wirkungssphäre bei Clausius.

Diese mittlere Weglänge wird kleiner, wenn sich nicht nur das eine Theilchen, sondern alle Molecüle gleichmässig bewegen. Wieder unter der Voraussetzung, dass alle Theilchen mit gleicher Geschwindigkeit nach allen Richtungen hin begabt sind, findet Clausius die wahrscheinliche mittlere Weglänge für diesen Fall der Bewegung aller Theilchen gleich $^3/_4$ von der oben berechneten [1]), und es wird also $L = \frac{3\lambda^3}{4\pi s^2}$. Nimmt man nicht eine gleiche Geschwindigkeit aller Molecüle an, so erhält man natürlich für die wahrscheinliche mittlere Weglänge einen anderen Werth. Unter Zugrundelegung des oben erwähnten Vertheilungsgesetzes der Geschwindigkeiten entwickelten Maxwell [2]) und danach auch O. E. Meyer [3]) auf anderem Wege für die mittlere wahrscheinliche Weglänge die Formel $L = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\lambda^3}{\pi s^2}$ [4]). Aus beiden Formeln aber folgte die Richtigkeit der Proportion: „Die mittlere Weglänge eines Molecüls verhält sich zum Radius der Wirkungssphäre, wie der vom Gas im Ganzen eingenommene Raum zu dem Theil des Raumes, welcher von den Wirkungssphären der Molecüle ausgefüllt wird [5])", und dieser Satz genügte für Clausius, um die gegen die mechanische Theorie der Gase erhobenen Einwände zum grössten Theile zu beseitigen. Zahlreiche und bedeutende Physiker hatten nämlich aus der mechanischen Theorie der Gase gefolgert, dass jedes Gas auch im Zustande der Ruhe eine ungeheure Bewegung zeigen und dass ein Gastheilchen den Raum eines Zimmers z. B. in einer Secunde mehrere hundert Mal durchlaufen müsste, was mit der langsamen Diffusion und der geringen Wärmeleitung

---

[1]) Den Beweis für die letztere Behauptung giebt Clausius hier noch nicht, weil der constante Factor $^3/_4$ hier noch ohne Bedeutung sei, er bezeichnet ihn aber als leicht.

[2]) Phil. Mag. (4) XIX, p. 19, 1860.

[3]) Kinetische Theorie der Gase, Breslau 1877, S. 118 u. 294; auch schon: De gasorum theoria, Breslau 1866. O. E. Meyer, geboren am 15. October 1834, Professor der Physik in Breslau.

[4]) Clausius sagt später (Wiedem. Ann. X, S. 92, 1880) über seine Annahme von lauter gleichen Moleculargeschwindigkeiten und den dadurch erhaltenen Factor $^3/_4$: „Da dieser Fall aber nur ein zur Aushülfe angenommener war, so stehe ich nicht an, den aus dem Maxwell'schen Gesetze abgeleiteten Werth $\sqrt{1/2}$ als einen der Wirklichkeit mehr entsprechenden anzuerkennen" (S. 95). Gegenüber anderen weiteren Angriffen (Kortewey, Arch. Néerlandaises des scienc. XII, p. 241, 1877) betont er aber, dass doch die Formeln nie genau werden können, so lange es nicht möglich ist, den Begriff der Wirkungssphäre scharf zu begrenzen. „Es scheint mir vielmehr, so schliesst er, so lange uns nähere Kenntnisse über die Molecüle fehlen, am angemessensten, sich bei der Bestimmung der mittleren Weglänge mit einer Annäherung zu begnügen . . . Diese Ungenauigkeit fällt dann in dieselbe Kategorie, wie die Abweichung der Gase vom Mariotte'schen und Gay-Lussac'schen Gesetze und von den anderen für den vollkommenen Gaszustand geltenden Gesetzen" (S. 102).

[5]) Pogg. Ann. CV, S. 250.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

der Gase, wie mit der Grösse der Schallgeschwindigkeit in der Luft durchaus nicht übereinstimmend schien. Mit Hülfe jener Proportion aber konnte Clausius zeigen, dass auch nach der neuen Gastheorie, obgleich die Geschwindigkeit der Molecüle eine sehr grosse ist, doch die wirkliche Bewegung derselben durch die Zusammenstösse auf einen sehr kleinen Raum beschränkt wird und somit die Uebertragung von Molecularbewegungen innerhalb der Gase immer nur eine verhältnissmässig langsame sein kann[1]). Für eine wirkliche Berechnung der freien Weglänge der Molecüle freilich reichten jene Formeln nicht aus, da dieselben noch zwei unbestimmte Grössen $\lambda$ und $s$, den mittleren Abstand der Molecüle und den Radius der Wirkungssphäre, enthielten. Die Berechnung der absoluten Grösse der Weglänge führte erst Maxwell ebenfalls noch in der erwähnten Abhandlung von 1860 mit Hülfe des Coefficienten der inneren Reibung der Gase durch.

Auf innere Widerstände bei der Bewegung tropfbarer Flüssigkeiten war man früh aufmerksam geworden, und Newton schon leitete dieselben aus einer gewissen Zähigkeit der Flüssigkeiten ab, doch wurden diese Widerstände lange nicht weiter beachtet und untersucht. Coulomb[2]) ersann um das Jahr 1803 einen Apparat zur Bestimmung solcher Widerstände, eine in ihrem Mittelpunkte an einem Faden horizontal aufgehängte Scheibe, die in der Flüssigkeit horizontale Schwingungen um den Mittelpunkt machte. Hagen[3]) und Poiseuille[4]) fanden um das Jahr 1840 gleichmässig, dass auch bei dem

---

[1]) Buys-Ballot (Pogg. Ann. CIII, S. 240, 1858) hatte zu Gunsten seiner Theorie der Aggregatzustände gegen die mechanische Gastheorie auf die langsame Ausbreitung des Rauches, die langsame Diffusion der Gase und die scharfe Begrenzung der Atmosphäre aufmerksam gemacht. Speciell über das Verhältniss seiner Theorie zu der von Clausius sagt er (Pogg. Ann. CIII, S. 250): „Man sieht, dass ich bei der Verdampfung für den ersten Augenblick auch eine geradlinige Bewegung angenommen habe, aber nur für einen Augenblick; ich gestehe zwar, dass es schwierig sei, die Gastheilchen ordentliche Vibrationen ausführen zu lassen, kann mich aber doch nicht dazu bequemen, die geradlinigen Bewegungen für immer beizubehalten. Wenn ich mich Herrn Clausius nähern wollte, so wäre es darin, dass ich die Bewegungsart, die er für Flüssigkeiten annimmt, der gemäss sich viele Theilchen zu anderen mit stets ändernden Geschwindigkeiten bewegen sollen, auf die Gase übertragen möchte. Eine geradlinige Bewegung allein scheint mir jedoch nicht zulässig.“ Wie Buys-Ballot sprachen sich auch R. Hoppe (Pogg. Ann. CIV, S. 279) und etwas später E. Jochmann (Pogg. Ann. CVIII, S. 153) gegen die mechanische Theorie der Gase aus. Der letztere meinte, dass die Schallgeschwindigkeit, wie auch die Gesetze der Bewegung der Gase nicht aus jener Theorie abgeleitet werden könnten.

[2]) Exp. destinées à déterminer la cohérence des fluides et les lois de leur résistance dans les mouvements très-lents, Mém. de l'Inst. III, An IX.

[3]) Pogg. Ann. XLVI, S. 423, 1839.

[4]) Compt. rend. XI, p. 961, 1046; XII, p. 112 u. a. O.

Strömen von Flüssigkeiten durch enge Röhren ein solcher Widerstand sich wirksam zeigte. Erklärten sich diese Widerstände durch ein gewisses Haften der aneinander vorüber sich bewegenden Flüssigkeitstheilchen anscheinend ohne besondere Schwierigkeit, so schienen die gleichen Vorgänge bei Gasen, wo nach den alten Vorstellungen nur Repulsivkräfte zwischen den Theilchen möglich waren, gänzlich ausgeschlossen; und doch entdeckte man auch hier solche Widerstände gegen innere Bewegungen, die wie die erwähnten bei Flüssigkeiten von einer inneren Reibung herzurühren schienen. E. Sabine[1]) zeigte um das Jahr 1829, dass die Schwingungen eines Pendels in einem mit Luft oder mit Wasserstoff gefüllten Gefässe bei gleichem Druck doch ungleiche Verzögerungen erlitten, Verzögerungen, die auch nicht der Dichte proportional, sondern in Wasserstoff verhältnissmässig grösser waren als in Luft. Danach hat man auch bei Berechnung von Pendelschwingungen stets einen diese Verzögerungen darstellenden Factor in Anwendung gebracht. G. G. Stokes wies im Jahre 1851[2]) nach, dass dieser Factor einer inneren Reibung der Gase entspreche, und gelangte durch Aufnahme dieses Factors in die Bewegungsgleichungen zu gut stimmenden Resultaten. Kurz vorher hatte auch Graham[3]) beim Ausfluss von Gasen durch Capillarröhren ähnliche starke Verminderungen der Geschwindigkeiten wie Poiseuille und Hagen bei Flüssigkeiten beobachtet, aus denen ebenfalls mit Sicherheit auf innere Reibung der Gase geschlossen werden konnte.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Alle Untersuchungen der inneren Reibung zeigten, dass dieselbe auf einer Uebertragung der Bewegung von den bewegten Flüssigkeitstheilchen auf die ruhenden oder auch von den schnelleren auf die langsameren beruhte. Während aber die alte Gastheorie diese Uebertragung nicht begreiflich machen konnte, wurde sie von der neuen Theorie geradezu gefordert. Wenn zwei Gasströme parallel, aber mit verschiedener Geschwindigkeit nebeneinander hergehen, so werden wegen der allseitigen Bewegung der Molecüle, solche aus dem einen Strome in den anderen übertreten. Da nun dabei die Molecüle ihre ursprüngliche Geschwindigkeit behalten, so werden diejenigen des schnelleren Stromes den langsameren beschleunigen, und umgekehrt wird der schnellere verzögert werden. Diese Verzögerung wird von der relativen Geschwindigkeit der einen Gasschicht gegen die andere so abhängen, dass sie dieser Geschwindigkeit einfach proportional ist. Ausserdem aber wird auch die Natur der reibenden

---

[1]) Phil. Trans. 1829, p. 207.

[2]) On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums, Cambridge Soc. Trans. IX, pt. I, 1851; auch Phil. Mag. (4) I, p. 337. Dubuat-Nancay soll den Begriff der innern Reibung bei Flüssigkeiten schon 1786 in seinen Principes d'hydraulique verwandt haben; ebenso Venturi in seinen Recherches s. l. communication latérale du mouvement dans les fluides, Paris 1797.

[3]) On the motion of gases, their effusion and transpiration, Phil. Trans. 1846, p. 573 u. 1849, p. 349.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Flüssigkeit selbst auf die Reibung von Einfluss, und jedenfalls wird dieselbe bei einer grösseren freien Weglänge der Molecüle auch selbst grösser sein. Man wird also die Reibung der Gase $F$ durch ein Product $F = \eta \cdot c$ aus der relativen Geschwindigkeit $c$ und einem Factor $\eta$ darstellen können, der die Abhängigkeit der Reibung von der Natur der Flüssigkeiten angiebt. Dieser Factor heisst der Coëfficient der inneren Reibung, und, wie eben angedeutet, muss derselbe die mittlere Weglänge der Molecüle enthalten [1]). Maxwell leitete für ihn die Formel $\eta = \frac{1}{3} d L u$ ab, wo $d$ die Dichte des betreffenden Gases und $L$ und $u$ wie vorher die mittlere Weglänge und die mittlere Geschwindigkeit der Gasmolecüle bezeichnen. Da nun $u$ schon bekannt und $d$ leicht messbar war, so bedurfte es in der That nur der experimentellen Bestimmung von $\eta$, um die mittlere Weglänge $L$ aus jener Formel berechnen zu können [2]).

Diese experimentelle Bestimmung führte Maxwell im Jahre 1866 [3]) fast gleichzeitig mit O. E. Meyer [4]) nach der von Coulomb erfundenen Methode aus. Hängt man, wie dieser, eine kreisrunde Scheibe an einem in ihrem Mittelpunkte befestigten Drahte horizontal schwebend auf, so lässt sich diese Scheibe durch Torsion des Drahtes in Schwingungen ver-

---

[1]) Ueber die Proportionalität von Geschwindigkeit und innerer Reibung sagte schon Newton (Principia mathematica, lib. II, sect. IX, 2. Aufl., p. 345): „Resistentiam, quae oritur ex defectu lubricitatis partium Fluidi, caeteris paribus, proportionalem esse velocitati, qua partes Fluidi separantur ab invicem.“ Streng genommen kann von einer relativen Geschwindigkeit zweier an einander grenzenden Schichten nur bei der äusseren Reibung verschiedener Stoffe die Rede sein. Im Innern einer homogenen Flüssigkeit sind die Differenzen der Geschwindigkeiten benachbarter Schichten unendlich klein, und hier kann die Reibung nur geschätzt werden nach dem Quotienten aus einer solchen unendlich kleinen Differenz und dem unendlich kleinen Abstand dieser benachbarten Schichten. Bezeichnet man die Normale auf die Ebene, an welcher die Reibung stattfindet, mit $x$, so ist die innere Reibung (auf die Einheit der Oberfläche berechnet) $F = \eta \frac{dc}{dx}$. Der Coëfficient $\eta$ der inneren Reibung ist danach diejenige Reibung, welche an der Flächeneinheit stattfindet, wenn die Geschwindigkeit sich in der zur Fläche normalen Richtung auf der Längeneinheit um die Einheit der Geschwindigkeit ändert. (Vergl. O. E. Meyer, Pogg. Ann. CXIII, S. 67 u. Kinet. Theor. d. Gase, S. 316.)

[2]) Da ganz in derselben Weise wie die Reibung auch die Diffusion der Gase von der mittleren Weglänge der Molecüle abhängen muss, so waren die Anhänger der neuen Gastheorie genöthigt, direct auch die Gesetze dieser Erscheinung aus den neuen Hypothesen abzuleiten. Hierauf ging Maxwell in dem zweiten Theile seiner Abhandlung von 1860 ein (Illustrations of the dynamical theory of gases; part. II: On the process of diffusion of two or more kinds of moving particles among on another, Phil. Mag. (4) XX, p. 21); eine Theorie der Diffusion auf Grund seiner späteren Hypothese über die Natur der Gasmolecüle gab er 1868 (Phil. Mag. (4) XXXV, p. 199).

[3]) Phil. Trans. 1866, p. 249.

[4]) Pogg. Ann. CXXV, S. 177, 401 und 564, 1866.

setzen, welche sie in ihrer eigenen Ebene um ihren Mittelpunkt ausführt. Die allmälige Abnahme der erregten Schwingungen hängt dann fast nur von der inneren Reibung der Gasart ab, in welcher die Scheibe schwingt; denn mit der Scheibe bleibt durch die Adhäsion eine dünne Gasschicht fest verbunden, die bei ihrer Bewegung sich an dem ruhenden Gase reibt. Eine etwa noch eintretende äussere Reibung zwischen der Scheibe und der Flüssigkeitsschicht selbst kann man durch Versuche mit Scheiben von verschiedener Grösse eliminiren. Diese Versuche ergaben nun das überraschende Resultat, dass die innere Reibung vom Druck oder der Dichte unabhängig ist, was allerdings nur dann möglich sein kann, wenn die Dichte $d$ mit der Verstärkung des Druckes um gerade so viel wächst, als die freie Weglänge dadurch abnimmt. Dass dies sich aber so verhalten muss, zeigt man leicht dadurch, dass man in die Formel für $\eta$ den früher für $L$ erhaltenen Werth $L = \frac{3}{4}\frac{\lambda^3}{\pi s^2}$ einsetzt. Dadurch wird $\eta = \frac{1}{4}\frac{d\lambda^3 u}{\pi s^2}$ oder auch, wenn man $d$ durch $mN$ ersetzt, wo $m$ das Moleculargewicht und $N$ die Anzahl der Molecüle in der Volumeneinheit bedeuten, $\eta = \frac{1}{4}\frac{mN\lambda^3 u}{\pi s^2}$, oder endlich, weil offenbar $N\lambda^3 = 1$, $\eta = \frac{1}{4}\frac{mu}{\pi s^2}$, d. i. ein Ausdruck, der die Dichte nicht mehr enthält. Um dieses Resultat und damit die Formel für den Coëfficienten noch weiter zu sichern, berechnete O. E. Meyer in einer zweiten Abhandlung [1]) den Coëfficienten der inneren Reibung auch aus den schon erwähnten Versuchsreihen, die Graham in den Jahren 1846 und 1849 über die Strömung der Gase durch Capillarröhren angestellt hatte. Diese Berechnung stimmte auch genügend mit dem Ergebniss der letzten Untersuchung überein.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Hat man aber aus dem Coëfficienten der inneren Reibung nach der Formel $\eta = \frac{1}{3} dLu$ die mittlere freie Weglänge der Molecüle berechnet, so erhält man sogleich auch, wenn man die Moleculargeschwindigkeit durch die freie Weglänge dividirt, die Anzahl der Zusammenstösse eines Molecüls mit anderen in einer Secunde. Diese Constanten der kinetischen Theorie der Gase stellte O. E. Meyer 1877 in einer Tabelle zusammen, die wir hier theilweise wiedergeben [2]):

---

[1]) Pogg. Ann. CXXVII, S. 253 u. 353, 1866.

[2]) Kinetische Theorie der Gase, S. 142.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

| Einheiten: cm u. sec. Temperatur: 20° C. Druck: 76 cm Quecksilber. | Reibungs-coëfficient | Weglänge | Stosszahl in Millionen | Molecular-gewicht |
|---|---|---|---|---|
| Wasserstoff . . . . . . | 0,000 093 | 0,00 001 855 | 9480 | 2 |
| Grubengas . . . . . . | 0,000 120 | 0,00 000 848 | 7330 | 15,97 |
| Ammoniak . . . . . . | 0,000 108 | 0,00 000 737 | 8130 | 17,01 |
| Kohlenoxyd . . . . . . | 0,000 184 | 0,00 000 985 | 4780 | 27,93 |
| Aethylen . . . . . . . | 0,000 109 | 0,00 000 582 | 8060 | 27,94 |
| Stickstoff . . . . . . . | 0,000 184 | 0,00 000 986 | 4760 | 28,02 |
| Stickoxyd . . . . . . . | 0,000 186 | 0,00 000 959 | 4735 | 29,97 |
| Sauerstoff . . . . . . . | 0,000 212 | 0,00 001 059 | 4065 | 31,92 |
| Schwefelwasserstoff . . | 0,000 130 | 0,00 000 628 | 6750 | 33,98 |
| Chlorwasserstoff . . . . | 0,000 156 | 0,00 000 734 | 5650 | 36,37 |
| Kohlensäure . . . . . . | 0,000 160 | 0,00 000 680 | 5510 | 43,89 |

Diese Erfolge zeigten, dass sich wenigstens die gasförmige Materie auf Grund der neueren Wärmetheorie ganz ohne elementare Kräfte der Molecüle rein kinetisch construiren liess. Die abstossende Kraft war ganz durch die lebendige Kraft der Bewegung und die anziehende durch die Zusammenstösse der Molecüle ersetzt, die, ebenso wie früher die Attraction, die Molecüle in Schwingungen um eine mittlere Lage erhielten. Allerdings gilt dies nur für vollkommene Gase, während man für nicht vollkommene Gase einen Einfluss elementarer Anziehungskräfte immer noch beibehalten musste. Indessen blieb auch die Theorie bei den vollkommenen Gasen noch nicht ohne Schwierigkeiten, und gerade einer ihrer eifrigsten Förderer, Maxwell, glaubte schliesslich ohne eine Abstossungskraft der Molecüle nicht auskommen zu können. Nach der Maxwell'schen Formel $\eta = \frac{1}{3} dLu$ ist nämlich die innere Reibung der Moleculargeschwindigkeit $u$ und damit der Quadratwurzel aus der lebendigen Kraft der Molecüle oder auch der Quadratwurzel aus der absoluten Temperatur des Gases direct proportional, vorausgesetzt, dass nicht auch die Weglänge von der Temperatur abhängig ist, denn dann könnte die innere Reibung in einem stärkeren Verhältniss als mit der Wurzel aus der Temperatur wachsen. Maxwell glaubte nun in der That die Unabhängigkeit der mittleren Weglänge von der Temperatur annehmen zu sollen, und da seine Messungen der inneren Reibung der Gase ihm ein Wachsthum derselben einfach proportional der Temperatur zu ergeben schienen, so kam er zu der Ueberzeugung, dass die bisher von ihm vertretene Theorie der Gase nicht aufrecht erhalten werden

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

könne. In einer Arbeit vom Jahre 1866[1]) gab er danach die vollständige Freiheit der Gasmolecüle in ihren Bewegungen und damit seine bisherigen theoretischen Grundlagen vollständig auf und gründete von da an seine mathematische Deduction der Bewegungen der Gasmolecüle auf die Hypothese, dass zwischen den Gasmolecülen eine Abstossungskraft wirke, die der fünften Potenz der Entfernung umgekehrt proportional sei. Damit trennte sich Maxwell nun von den anderen Mitarbeitern auf diesem Gebiete, ohne dass er dabei doch den Beifall der übrigen Physiker voll errungen hätte. O. E. Meyer sagt in seiner kinetischen Theorie der Gase[2]) über diese Annahme von Maxwell: „Ich würde mich wohl einer Auffassung anschliessen können, welche die momentan wirkenden Stosskräfte der älteren Theorie durch stetig wirkende, nur in sehr kleiner Entfernung merkbare Kräfte ersetzte; doch vermag ich Maxwell's veränderter Ansicht nicht beizutreten und sehe keine dazu zwingenden Gründe ein. Erstens ist das von Maxwell aus seinen Beobachtungen erschlossene Gesetz für die von ihm untersuchten permanenten Gase gar nicht richtig; nach von Obermayer und Puluj gilt es angenähert für einige der Verdichtung fähige Gase. Zweitens ist der viel wichtigere Punkt zu berücksichtigen, dass Maxwell's neue Theorie einen Widerspruch in sich selbst einschliesst, wenn für die abstossenden Kräfte das Gesetz der Abnahme im umgekehrten Verhältnisse der fünften Potenz der Entfernung angenommen wird. Denn nach dieser Hypothese wird der Werth der ausgeübten Kraft nicht verschwindend klein, wenn die Entfernung einen Werth von endlicher Grösse erreicht. Die Molecüle, welche somit stets dem Einflusse von fernwirkenden Kräften ausgesetzt sind, bewegen sich zwischen zwei Zusammenstössen nicht frei von Kräften und nicht geradlinig. Dann gilt auch nicht das . . . Gesetz Maxwell's über die Vertheilung der Geschwindigkeiten; mit einem Worte, dann fällt die ganze Theorie in sich zusammen. Drittens widerspricht die neue Hypothese Maxwell's nicht bloss dieser Theorie, sondern auch der Erfahrung. Joule und Thomson haben ... experimentell nachgewiesen, dass zwischen Gastheilchen anziehende, nicht aber abstossende Kräfte thätig sind. Jede Theorie, welche von der Hypothese molecularer Abstossung ausgeht, ist daher von vornherein zu verwerfen.“ In der That waren Joule und Thomson bei ihren gemeinsamen Arbeiten von 1853 und 1854[3]) zu dem Resultate gekommen, dass zwischen den Gasmolecülen zwar noch eine fernwirkende Kraft, aber eine Cohäsion von fast verschwindender Kleinheit thätig ist. Die repulsiven und elastischen Kräfte nicht bloss der Gase, sondern auch der Flüssigkeiten und festen Körper hat W. Thomson bis auf

[1]) Phil. Mag. (4) XXXII, p. 390, 1866; ibid. XXXV, p. 129 u. 185, 1868.
[2]) Kinet. Theor. d. Gase. Breslau 1877, S. 161.
[3]) On the Thermal Effects of Fluids in Motion, Phil. Trans. 1853, p. 357 u. 1854, p. 321.

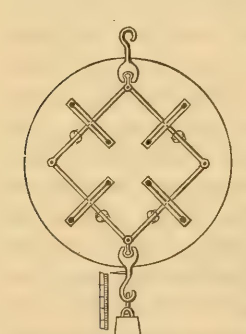
Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

die neueste Zeit [1]) in mehreren Abhandlungen auf lebendige Kräfte der Bewegungen zurückzuführen sich bemüht, und darüber, ob die bleibenden anziehenden Kräfte als elementare oder auch wieder als abgeleitete anzusehen sind, hat auch er nichts ausgemacht. Trotz der Umkehr Maxwell's sind denn auch die Anhänger der neueren Gastheorie meist dabei stehen geblieben, wenigstens die repulsiven Kräfte der Gase rein aus den Bewegungen der Molecüle herzuleiten. Boltzmann zwar schloss sich zuerst an Maxwell an und benutzte dessen Wirkungsgesetz bei seinen Studien über das Wärmegleichgewicht der Gasmolecüle [2]). Doch macht er in einer Abhandlung letzter Zeit [3]) darauf aufmerksam, dass man durch mehrere Annahmen über die Grundkräfte der Molecüle den Thatsachen entsprechen könne, dass die Annahme elastischer Atome zwar einer Annahme repulsiver Kräfte gleichkomme, dass man aber durch die Voraussetzung blosser attractiver Kräfte zwischen den Molecülen die Erscheinungen gerade so erklären könne, wie durch die Voraussetzung blosser repulsiver Kräfte, und danach kommt er zu dem Schluss, dass die erstere Annahme vor der letzteren doch vielleicht noch Vortheile voraus habe.

Nach der Bestimmung der Geschwindigkeit und freien Weglänge der Gasmolecüle blieb der kinetischen Gastheorie noch die Berechnung der Grösse derselben und ihrer Anzahl in einem gegebenen Raume übrig. Den ersten Versuch zur Berechnung der Grösse der Molecüle machte J. Loschmidt im Jahre 1865 [4]). Bezeichnet man die Grösse $\frac{D^2}{4} L\pi$ (wo $D$ und $L$ wie früher den Durchmesser und die freie Weg-

---

[1]) S. Steps towards a kinetic theory of matter, Nature XXX, p. 417, 1884. In dieser Abhandlung beschreibt Thomson auch das Modell einer Federwaage, in welcher aber die elastische Kraft der Feder durch die Beharrungskraft rotirender Flugräder ersetzt ist. (S. die beistehende Figur aus Nature XXX, p. 419.)



[2]) Wiener Sitzungsber. LXVI, S. 213: Ueber das Wirkungsgesetz der Molecularkräfte. Auch ibid. LXVI, S. 273 u. s. w.

[3]) Wiedem. Ann. XXIV, S. 37, 1885: Ueber die Möglichkeit der Begründung der kinetischen Gastheorie auf anziehende Kräfte allein. Boltzmann sagt da (S. 38): „Ebensowenig als das der elastischen Kugeln dürfte dieses Wirkungsgesetz (das Maxwell'sche) gerade das der Natur entsprechende sein. . . . Es schiene mir sogar nicht unnütz, die Gastheorie auch unter Zugrundelegung noch anderer und möglichst mannigfaltiger Vorstellungen über das Verhalten der Gasmolecüle durchzubilden, um dann entscheiden zu können, welches Verhalten demjenigen der Molecüle in der Natur, die jedenfalls sehr complicirte Individuen sind, am nächsten kommt“.

[4]) Zur Grösse der Luftmolecüle, Wiener Sitzungsber. LII, 2. Abth., S. 395, 1866. J. Loschmidt, geb. am 15. März 1821, Professor der Physik an der Universität Wien.

länge eines Molecüls bedeuten) als das moleculare Wegvolumen und den Quotienten aus dem Volumen und der Anzahl der darin enthaltenen Molecüle als das moleculare Gasvolumen, so folgt leicht, dass das erstere Volumen nur $^3/_{16}$ von dem letzteren sein kann. Nach Clausius ist nämlich $L = \frac{3}{4} \cdot \frac{\lambda^3}{\pi D^2}$ [1]) und damit das gesammte Wegvolumen der $N$ in der Volumeneinheit enthaltenen Molecüle $\frac{D^2}{4} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{\lambda^3}{\pi D^2} \cdot \pi \cdot N$; das Verhältniss des gesammten Wegvolumens zum gesammten Gasvolumen der Volumeneinheit ist also $\frac{3}{16} \cdot N\lambda^3 : 1$, oder, da wie früher $N\lambda^3 = 1$ [2]) zu setzen ist, auch $\frac{3}{16} : 1$. Das wirkliche Volumen $\frac{D^3}{6}\pi$ eines Gasmolecüls ist natürlich kleiner als das moleculare Gasvolumen. Nehmen wir $v$ als die Zahl an, mit der man das letztere multipliciren muss, um das erstere zu erhalten, so können wir nun das moleculare Gasvolumen doppelt ausdrücken, und aus der so entstehenden Gleichung

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

$$v \cdot \frac{16}{3} \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L \cdot \pi = \frac{D^3}{6} \cdot \pi$$

folgt $D = 8vL$. Die Zahl $v$ nannte Loschmidt den Verdichtungsfactor des betreffenden Gases. Nimmt man an, dass im flüssigen Zustand die Molecüle einander direct berühren, so ist der Verdichtungsfactor durch das Verhältniss der Dichten der Materie im festen und flüssigen Zustande gegeben, und $D$ kann danach berechnet werden. Wahrscheinlich bleibt freilich dabei, dass auch im flüssigen Zustande die Molecüle noch immer eine gewisse Entfernung von einander halten und dass danach die für die Durchmesser erhaltenen Werthe nur einen Grenzwerth und zwar den oberen der betreffenden Grössen darstellen. Loschmidt besass damals nur für die atmosphärische Luft die Kenntniss der mittleren Weglänge, für die aber, weil sie nicht condensirt werden konnte, der Verdichtungscoëfficient nicht zu berechnen war. Es gelang ihm indessen, denselben auf indirectem Wege zu $^1/_{1155}$ zu bestimmen und danach fand er den Durchmesser eines Luftmolecüls $D$ gleich 0,00 000 118 mm. Nachdem später die freien Weglängen der Molecüle für eine grössere Anzahl von Stoffen bekannt geworden waren, konnte man auch die Berechnung der Moleculardimensionen weiterführen, und O. E. Meyer gab in seiner kinetischen Theorie der Gase schon die folgenden, nach der Methode von Loschmidt berechneten Zahlen [3]):

[1]) Siehe S. 563.

[2]) Siehe S. 567.

[3]) Kinet. Theorie der Gase, Breslau 1877, S. 226. Es scheint, als wäre es vorsichtiger, hier immer für Moleculardurchmesser im Sinne von Clausius

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

| | Dichtigkeit | | Condensat.-Coëfficient $v$ | Molecular-Durchm. $D$ in Milliontel Millimeter |
|---|---|---|---|---|
| | gasförmig | flüssig | | |
| Wasser . . . . . . . . | 0,6235 | 1 | 0,00 081 | 0,44 |
| Ammoniak . . . . . . | 0,5967 | 0,6502 | 0,00 119 | 0,45 |
| Schwefelwasserstoff . . | 1,1912 | 0,9 | 0,00 168 | 0,89 |
| Kohlensäure . . . . . . | 1,5291 | 0,9985 | 0,00 198 | 1,14 |
| Stickoxydul . . . . . . | 1,5204 | 0,9646 | 0,00 204 | 1,18 |
| Cyan . . . . . . . . . . | 1,8064 | 0,866 | 0,00 270 | 0,96 |
| Schweflige Säure . . . | 2,247 | 1,49 | 0,00 195 | 0,80 |
| Chlor . . . . . . . . . | 2,450 | 1,33 | 0,00 238 | 0,96 [1] |

Wie angedeutet, können die hier gegebenen Werthe der Moleculardurchmesser nur als obere Grenzen angesehen werden. Die wirklichen Werthe dieser Durchmesser versuchte zum ersten Mal van der Waals [2]) zu erreichen, indem er davon ausging, dass die Abweichungen der Gase vom Mariotte'schen Gesetze vor Allem von der Grösse der Gasmolecüle herrühren, und dann rückwärts diese Grössen aus jenen Abweichungen zu berechnen versuchte. Einen anderen Weg zu demselben Ziele schlug dann noch E. Dorn [3]) ein, der die Dimensionen der Molecüle aus den Dielektricitätsconstanten der betreffenden Stoffe abzuleiten sich bemühte. Die von ihm gegebenen folgenden Werthe

---

Radius der Wirkungssphäre zu setzen, wo dieser Radius die Entfernung bedeutet, bis zu welcher die Schwerpunkte der Molecüle sich höchstens einander nähern können. Da wir aber als absoluten Hinderungsgrund für eine Materie in einen Raum einzudringen, doch nichts anderes als wieder Materie denken können, so fällt der Begriff der Wirkungssphäre doch mit dem Begriff eines materiell erfüllten Raumes zusammen.

[1]) O. E. Meyer vergleicht (Kinet. Theorie der Gase, S. 234) diese Zahlen mit den früher auf ganz anderen Wegen von Faraday, Plateau, Quincke, Thomson u. A. erhaltenen Grenzwerthen der Ausdehnung der Molecüle und findet, dass keiner dieser Werthe den hier gegebenen widerspricht, ja dass sie theilweise die letzteren recht gut bestätigen.

[2]) Over de continuiteit van den gas- en vloeistoftoestand, Leiden 1873; Auszug in den Beibl. zu Pogg. Ann. I, S. 10, 1877.

[3]) Wiedem. Ann. XIII, S. 378, 1881. E. Dorn, geb. am 27. Juli 1848, Prof. an der Universität Halle.

| | Formel | $D \times 10^7$ nach Dorn | $D \times 10^7$ nach v. d. Waals |
|---|---|---|---|
| Atm. Luft . . . . . . . | | 1,6 mm | 3,0 |
| Kohlensäure . . . . . . | $CO_2$ | 1,8 „ | 1,8 |
| Wasserstoff . . . . . . | $H_2$ | 1,4 „ | 1,4 |
| Stickoxydul . . . . . . | $N_2O$ | 1,8 „ | |
| Schweflige Säure . . . . | $SO_2$ | 6,9 „ | |

stimmen so ziemlich mit den von van der Waals erhaltenen und sind, wie zu erwarten, bedeutend grösser als die von Meyer berechneten Zahlen.

Die Anzahl der Molecüle endlich und ihre Entfernung von einander liess sich nun mit derselben Genauigkeit wie die Grösse derselben berechnen. O. E. Meyer giebt für die Anzahl der Molecüle in 1 ccm Werth $N = 21$ Trillionen und für die Entfernung zweier benachbarten die Zahl $\lambda = 3$ bis 4 Milliontel-Millimeter, welche Zahlen nach dem Avogadro'schen Gesetz für alle Gase gelten [1]).

Das Auftreten und Wachsen der kinetischen Gastheorie hat seinen ganz eigenen, charakteristischen Habitus. Im Grunde gänzlich aus dem Rahmen der noch herrschenden Newton'schen Physik heraustretend, behielt die Theorie im Aeusseren die Kennzeichen der letzteren vollständig bei, und obgleich sie alle Erscheinungen nur aus Bewegungen erklärte, liess sie doch auch (vor Allem ausserhalb ihres Gebietes) die alten primitiven Spannkräfte ohne Weiteres gelten. Damit nahm man einerseits allerdings der ganzen Wendung den revolutionären Charakter und erleichterte die allgemeine Anerkennung derselben; andererseits aber unterband man auch den Einfluss, den die neue Anschauung auf die anderen Zweige der Physik hätte ausüben können, und gab die Einheitlichkeit der Anschauung in Bezug auf die Materie, wie die Kraft vollständig preis. Dieses Reformiren im engeren Kreise, dieses Ausreifen einer Neuerung auf speciellem Gebiete ist für die ganze neuere Physik typisch geworden. Es hat dies den grossen Vortheil, dass alles etwaige Ueberstürzen des Fortschritts auf kleine Theile beschränkt und so unschädlich gemacht und dass eine principielle Neuerung auf übersichtlichem Terrain durchgeführt wird, bevor sie Ansprüche auf allgemeinere Beachtung erheben darf. Es hat dies aber auch mindestens den Nachtheil, dass die physikalischen Gebiete ganz heterogen behandelt werden, dass der wissenschaftliche Zusammenhang zwischen den einzelnen Gebieten verloren zu gehen droht und dass der

[1]) Kinet. Theorie der Gase, Breslau 1877, S. 232.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

strebende Jünger der Wissenschaft auf dem einen Gebiete auf Ziele hingewiesen und zu Gedanken angeregt wird, die ihm auf einem anderen Gebiete verschlossen und absolut verboten sind. Diese neuere Richtung nützt dadurch, dass sie den Streitigkeiten den Boden entzieht und den Frieden sichert, aber sie schadet auch insofern, als sie nicht bloss die Gebiete, sondern auch die Arbeiter so sehr von einander trennt, dass die Verständigung zwischen den einzelnen Gruppen oft ganz unterbleibt.

Natürlich gilt diese Charakteristik nicht für alle neueren Physiker. Vielmehr hatte man gleich nach der Aufstellung des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft und dem Wiederaufgreifen der mechanischen Wärmetheorie von anderer Seite her sehr ernstlich Anstalten dazu gemacht, den gesammten Anschauungskreis den Neuerungen entsprechend umzugestalten. Diese Umgestaltung ging im letzten Ziele auf die Beseitigung aller elementaren primitiven Kräfte der Materie oder besser auf die Ableitung derselben aus ursprünglichen inneren Bewegungen der Materie. Da diese Beseitigung oder Zurückführung in aller Strenge aber für die gesammte Physik zur Zeit noch nicht möglich erschien, so versuchte man es folgerichtig mit einem Auswege. Man bemühte sich die anschaubaren, unseren Sinnen zugänglichen Bewegungen zu fassen und nach ihren Gesetzen zu beschreiben und versuchte die elementaren oder die letzten Ursachen derselben, mochten nun diese ursprüngliche Kräfte oder ursprüngliche Bewegungen der Atome sein, ausserhalb der wissenschaftlichen Discussion zu lassen. Das war der alte, reine Newtonianische Standpunkt, ihn fassten in echter Nachfolge ihres grossen Landsmannes zuerst die Engländer ins Auge.

Das Gesetz von der Erhaltung der Kraft bezieht sich nicht auf die gedachten, elementaren Qualitäten der Materie, die man im alten Sinne als constitutive Kräfte derselben bezeichnet, sondern nur auf die quantitativ bestimmte Arbeitsfähigkeit, die ein Körper nach seiner Lage und Umgebung entwickeln kann. Für diese ganz bestimmte Arbeitsfähigkeit hatte Th. Young schon im Jahre 1807 [1]) den Namen Energie vorgeschlagen, ohne damit weitere Beachtung zu finden. Jetzt war es an der Zeit, diesen Vorschlag wieder aufzunehmen, den zweideutigen Begriff der Kraft den Elementarqualitäten der Materie ganz zu reserviren, und das Gesetz von der Erhaltung der Kraft besser als das Gesetz von der Erhaltung der Energie zu bezeichnen. Dieser Gebrauch des Wortes Energie erforderte aber eine Verallgemeinerung des Begriffs derselben. Young hatte das Wort nur in mechanischem Sinne gebraucht und unter Energie nur die Arbeitsfähigkeit bewegter Massen verstanden, die leicht durch das Product aus Masse und Geschwindigkeitsquadrat zu messen war. Jetzt aber musste man den Begriff auch allgemein

---

[1]) Lectures on natural philosophy, London 1808, I, p. 79; siehe S. 245 d. B.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

physikalisch interpretiren und auch auf die Arbeitsfähigkeiten ruhender Körper anwenden, die man sonst nur indirect als die Wirkung von Massenattractionen, elektrischen Kräften u. s. w. zu bezeichnen pflegte. In voller Allgemeinheit und mit dem klaren Bewusstsein der weiten Folgen that dies Rankine noch im Jahre 1853. In seiner Abhandlung On the general law of the transformation of energy[1]) gab er die folgenden, ganz umfassenden Definitionen: Energie ist jede Affection einer Substanz, welche in einer Kraft besteht oder vergleichbar ist mit einer Kraft, die fähig ist, Veränderungen hervorzubringen, bei denen ein Widerstand überwältigt werden muss. Actuelle Energie ist eine messbare oder übertragbare oder umwandelbare Affection einer Substanz, deren Gegenwart in einer Substanz eine Neigung veranlasst, in einer oder mehreren Hinsichten ihren Zustand zu ändern. Beim Eintritt dieser Veränderung verschwindet die actuelle Energie und wird ersetzt durch die potentielle Energie[2]), welche gemessen wird durch die Grösse der Veränderung im Zustande einer Substanz, in Verbindung mit der Grösse der Neigung oder Kraft, wodurch diese Veränderung herbeigeführt worden ist. Danach sprach Rankine dann das Gesetz von der Erhaltung in der Form aus: Die Summe aller (potentiellen und actuellen) Energie im Universum ist unveränderlich. Zwei Jahre später[3]) gab Rankine dann noch als Zweck dieser neuen Definitionen ausdrücklich an, dass sie gemacht seien, um an Stelle der nur hypothetischen Atome und ihrer Kräfte neue Abstracta zu setzen, die nichts Hypothetisches mehr enthielten und rein von den Thatsachen abgezogen wären.

Die neuen Begriffe fanden schnell den allgemeinen Beifall. Die Bereitwilligkeit, mit der sie aufgenommen und benutzt wurden, lässt klar erkennen, dass man mit den alten Begriffen der Elementarkräfte wirklich nicht mehr viel anzufangen wusste und eine Elimination derselben für nützlich hielt. In England gebrauchte W. Thomson, der den Begriff Energie schon vorher verwandt hatte, die Rankine'sche Nomenclatur fortan ausschliesslich bei seinen Arbeiten, und J. Clerk Maxwell that bald desgleichen. In Deutschland empfahl Helmholtz in seinen Referaten über die Rankine'schen Abhandlungen dessen Definitionen als „passend gewählt“[4]), obwohl er seine philosophischen Grundanschauungen

[1]) Phil. Mag. (4) V, p. 106, 1853.

[2]) Rankine machte (Phil. Mag. (4) XXVIII, p. 404) selbst darauf aufmerksam, dass der Begriff der potentiellen Energie schon von Sadi Carnot allerdings nur auf mechanischem Gebiete als force vive virtuelle gebraucht worden sei.

[3]) The Edinburgh new philosophical Journal (2) II, p. 120, 1855: Outlines of the science of energetics.

[4]) Fortschritte der Physik IX, S. 407. Helmholtz macht dabei die Bemerkung, dass die Begriffe Energie, actuelle und potentielle Energie

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

nicht theilen konnte [1]). Auch Clausius ging direct zur Verwerthung der neuen Ideen über, und danach brachen sich dieselben auch in Deutschland, wenn auch langsamer als in England, Bahn [2]). Im Jahre 1870 behandelte der berühmte englische Physiker Balfour-Stewart in einem kurzen Lehrbuche [3]) (nachdem er einen kurzen Abschnitt über mechanische Kraft vorausgeschickt) sämmtliche Naturerscheinungen nur als Bethätigungen eines und desselben, unter immer wechselnden Formen auftretenden Princips — der Energie. Der bedeutende englische Mathematiker Clifford aber bemühte sich 1873, dem alten Kraftgespenste zu Gunsten der Energie ganz den Garaus zu machen [4]). Alles, sagt Clifford, was wir in Bezug auf Kraft und Bewegung wissen, ist dies, dass eine gewisse Gruppirung der umgebenden Körper eine gewisse Aenderung in der Bewegung eines Körpers hervorbringt. Nun ist es üblich zu sagen, diese Gruppirung der umgebenden Körper erzeuge eine gewisse Kraft, und diese Kraft sei es, welche die Aenderung der Bewegung hervorbringt. Wozu aber überhaupt dieses Zwischenglied? Warum gehen wir nicht auf einmal von den Umständen der Umgebung zu der aus ihnen folgenden Bewegungsänderung? Wenn wir uns nur gewöhnen, direct von dem einen auf das andere überzugehen ohne Vermittelung des dazwischen geschobenen Begriffs der Kraft, so wird dieser aufhören nöthig zu sein und gleich anderen nutzlosen Begriffen allmälig der Vergessenheit anheimfallen, und damit wird auch die Tendenz schwinden, diesem Phantom so reale und materielle Eigenschaften beizulegen, wie die Unzerstörbarkeit eine ist.

Die Bemühungen um die Elimination des Kraftbegriffes, um die Ersetzung desselben durch den Begriff der begrenzten Wirkungsfähigkeit, der Energie, erschienen als eine Umkehr von dem Standpunkte, den die Schüler Newton's seit 200 Jahren ausgebildet, zu der echten unverfälschten Anschauung des Meisters, wie sie in dem viel citirten und ebenso oft vergessenen Ausspruche: Hypothesis non fingo gipfelte. Dem durch das Stürzen der alten Theorie kritisch gestimmten Zeitalter kam auch gerade diese Anschauung als besonders sicher und fruchtbar vor, und so entwickelte sich ein grosser Theil der Physik vor Allem nach dieser Richtung hin auf Grund des Gesetzes von der Erhaltung der Energie in überraschend schneller Weise.

---

mit den in seiner Abhandlung über die Erhaltung der Kraft gebrauchten Arbeitsgrösse, lebendige Kraft und Quantität der Spannkräfte identisch sind.

[1]) Fortschritte der Physik XI, S. 365.

[2]) In dem seiner Zeit viel gebrauchten Lehrbuche der Physik von Eisenlohr, in der Auflage von 1863, findet sich z. B. das Wort Energie noch nicht.

[3]) Uebersetzt von Rob. Schenk, Braunschweig 1872.

[4]) Nature XXII, p. 122, 1873. — W. R. Clifford, 1845—1879, Prof. der angew. Mathematik am University College in London.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Die mathematische Physik fand in dem Begriffe der begrenzten Wirkungsfähigkeit, der Energie, ein vorzüglich geeignetes Substrat ihrer formellen Entwickelungen und eroberte mit Hülfe des Potentialbegriffs, der so eng mit jenem zusammenhängt, die gesammten Gebiete der Physik, von denen sie zu Anfang unseres Jahrhunderts nur die Mechanik, einzelne Theile der Optik und ganz geringe Enclaven in der Wärmelehre und Akustik in Betracht gezogen hatte. Selbst die Experimentalphysik lernte, in dem Gebiete der Elektrik vor Allem, die neuen Begriffe den alten vorziehen, und auch für die Experimentalphysiker verloren die alten elementaren Kräfte gegenüber den Begriffen der Arbeit und des Potentials fast allen Glanz.

Nur der Speculation, der Bethätigung der Philosophie schien mit der Elimination der Frage nach den Ursachen der Phänomene nicht bloss factisch der Boden entzogen, sondern mit den Erfolgen der beiden anderen methodischen Factoren in der Physik auch jeder rechtliche Anspruch auf eine Beachtung abgeschnitten. Und doch schien es nur so.

So sehr viele Physiker auch das vollständige Genügen des neuen physikalischen Begriffs der Energie für die Wissenschaft betonten, so konnte dies doch das Wiederaufwerfen der Frage nach den Ursachen der Arbeitsfähigkeit von anderer Seite her nicht hindern. Da aber dabei die Ursache der kinetischen Energie leicht wieder als kinetische oder auch potentielle Energie zu erkennen war, so fragte man sich vor Allem nach dem Ursprunge der potentiellen Energie. Und da man schon mehrere Male vermeintliche potentielle Energien, wie z. B. die des Licht- und des Wärmestoffs, auf kinetische Energien der Atombewegung zurückgeführt hatte, so hoffte man das nun für alle Energien durchführen zu können.

Am ersten wäre das wohl für die Elektricität zu erwarten gewesen. Indessen haben wir schon in der vorigen Periode gesehen, dass das Erkennen gerade dieser Aufgabe leichter war als das Lösen derselben, und auch in der Gegenwart ist es noch nicht gelungen, diejenigen Bewegungen der Atome des Aethers oder der ponderablen Materie anzugeben, aus denen die Eigenthümlichkeiten der elektrischen Erscheinungen, vor Allem die Polarität derselben, hätte abgeleitet werden können. Danach blieb denn nichts Anderes übrig, als dass man sich mit der Frage nach dem Ursprung der Kräfte zu der Kraft zurückwandte, deren Wirkungen die ganze Natur am stärksten beherrschen und deren kinetische Erklärung darum auch am folgenreichsten schien, zur Gravitation. Da die Schwere aller sicht- und tastbaren Materie eigenthümlich, da sie das sicherste, ja das einzige Maass für die Menge dieser Materie ist, so schien auch die Frage nach der Gravitation am engsten mit der Constitution der Materie vereinigt und eine Theorie der letzteren vor Allem an die Untersuchung der ersteren gebunden zu sein. Von dieser Erkenntniss aus wurde in der Gegenwart die alte

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Frage nach der causa gravitatis, die durch die Newton'sche Schule lange Zeit verpönt worden war, aufs Neue aufgethan, nur nicht mehr wie früher von materialistischen Philosophen, sondern diesmal von speculativen Physikern, was ihr nicht zum Nachtheil gereichte.

Der erste dieser Physiker war John Herapath, der in den schon erwähnten Abhandlungen von 1821 und 1847 [1]) auch die Gravitation auf die thermischen Bewegungen der Körper zurückführte. Jeder warme Körper wird nach ihm auf ein kälteres, ihn umgebendes Medium vermöge seiner Wärme eine Abstossungskraft so ausüben, dass das Medium in seiner Nähe verdünnt und also mit der grösseren Entfernung immer dichter wird. Dadurch wird ein Aetherdruck erzeugt, der von aussen nach dem Centrum hin gerichtet ist. Befinden sich nun in einem dünneren Medium zwei dichtere Körper, von denen der eine wärmere dem kälteren Wärme zusendet, so wird, weil der dichte Körper die Wärme mehr aufnimmt als das dünnere Medium, an der beleuchteten Seite des zweiten Körpers der Aether verdünnt und auf der dunklen verdichtet sein. Die so erzeugte Druckdifferenz wird dann den zweiten Körper nach dem ersteren hintreiben und den Schein einer von dem wärmeren auf den kälteren Körper ausgeübten Anziehung erzeugen. Indessen ist es nicht wahrscheinlich, dass eine Temperaturdifferenz an einem Körper auch eine Druckdifferenz hervorbringen müsse, da der Aether bei seiner Verdünnung durch die Wärme zum Ersatz wieder eine grössere Elasticität erhalten wird; und selbst diese Druckdifferenz zugegeben, würde es schwer sein, für deren Wirkungen die Geltung der Newton'schen Gesetze nachzuweisen.

Im Jahre 1849 versuchte F. de Boucheporn alle Bewegungen der Körper, vor Allem die der Himmelskörper, nicht aus fernwirkenden Kräften, sondern aus den Eigenbewegungen derselben in dem widerstehenden Aether abzuleiten, ebenfalls ohne nennenswerthen Erfolg [2]).

---

[1]) Thomson's Annals of Philosophy XVII, 1821; Mathematical Physics, London 1847.

[2]) Recherches sur les lois de physique considerées comme des conséquences des seules propriétés essentielles de la matière, l'impénétrabilité et l'inertie, Compt. rend. XXIX, p. 107, 1849. „Ist nicht die Bewegung, so sagt Boucheporn, in einem widerstehenden Mittel die Bedingung und die Ursache der allgemeinen Gravitation? Alle anziehenden und abstossenden Körper sind in Bewegung, wie sich nun auch an der Sonne gezeigt hat. Wenn sich der Körper $A$ bewegt, so bringt der Aether, welcher in den von dem Körper verlassenen Raum hineinstürzt, in allen Theilen der Flüssigkeit eine Art von Zug (aspiration) gegen den Punkt hervor, welchen das Centrum des Körpers eben verlassen hat. Jeder andere Körper $B$, der auf der $A$ zugewendeten Seite diese aspirirenden Wellen empfängt, verliert da ganz oder zum Theil seinen Eigendruck (pression propre), und der halbe Druck $\frac{1}{2}\, n\, v$, welcher auf der entgegengesetzten Seite wirkt, wird nicht mehr durch den Gegendruck aufgehoben, und der Körper $B$ wird sich nach $A$ hin-

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Ohne eine bestimmte Theorie zu geben, sprach sich 1852 G. Lamé [1]) mit grosser Bestimmtheit für die kinetischen Erklärungen der physikalischen Kräfte aus. „Das Dasein eines Aetherfluidums, so sagt er, ist unwiderleglich bewiesen . . . . Wenn dieses Fluidum auch nicht die alleinige Ursache aller beobachtbaren Thatsachen ist, so muss es sie wenigstens modificiren, sie fortpflanzen und ihre Gesetze compliciren. Ohne Annahme dieses Agens, dessen Gegenwart unvermeidlich ist, ist es also nicht mehr möglich, zu einer vollständigen und rationellen Erklärung der Erscheinungen in der physischen Natur zu gelangen. Man darf nicht bezweifeln, dass diese Annahme, verständig durchgeführt, das Geheimniss oder die wahre Ursache derjenigen Effecte finden lassen wird, welche man dem Wärmestoff, der Elektricität, dem Magnetismus, der allgemeinen Anziehung, der Cohäsion und den chemischen Kräften zuschreibt, denn alle diese mysteriösen und unbegreiflichen Wesen sind im Grunde nur coordinirte Hypothesen, die bei unserer gegenwärtigen Unwissenheit ohne Zweifel nützlich sind, aber doch durch die Fortschritte der wahren Wissenschaft zuletzt entfernt werden.“

J. Waterston knüpfte 1858 an Faraday's letzte Vorstellungen von der Materialität des Raumes an und schrieb diesem direct die in jedem Punkte desselben wirkenden Kräfte zu [2]).

Eine Undulationstheorie der Gravitation begann seit 1859 J. Challis [3]) theoretisch auszubilden. Danach werden die physikalischen Kräfte durch die Bewegungen eines elastischen, den Raum continuirlich erfüllenden Mediums verursacht, das wir Aether nennen. Trifft nämlich ein Wellenzug dieses Mediums auf eine vollkommen glatte Kugel, so nimmt dieselbe, wenn die Breite der Wellen gegenüber dem Durchmesser der Kugel gering ist, eine Bewegung in der Fortpflanzungsrichtung der Wellen, wenn die Breite der letztzteren dagegen sehr gross ist, eine Bewegung entgegen dieser Richtung an; im ersteren Falle zeigt sich eine scheinbare Abstossung, im zweiten eine scheinbare Anziehung gegen den Ausgangspunkt der Wellenzüge. Die Abstossung wirkt im umgekehrten Verhältniss der vierten, die Anziehung im umgekehrten Verhältniss der zweiten Potenzen der Entfernungen.

---

bewegen.“ Dr. Kremers sagt in „Fortschritte der Physik“ V, S. 18 über diese Arbeit: „Ein näheres Eingehen auf die für diese Ansicht beigebrachten Beweise möchte schon darum überflüssig sein, weil dieselbe nicht mehr neu ist, dann aber auch, weil sie der Materie etwas raubt, was allein nur eine Harmonie bedingen kann“.

[1]) Aus Leçons s. l. théorie math. de l'élasticité d. corps solides (Paris 1852) nach Pogg. Ann., Erg. VI, S. 97. — Gabriel Lamé, 1795–1870, Prof. an der Pariser Facultät der Wissenschaften.

[2]) Phil. Mag. (4) XV, p. 329. J. Schlesinger hat (Substantielle Wesenheit des Raumes und der Kraft, Wien 1885. Die geistige Mechanik der Natur, Leipzig 1888.) auf diese Vorstellung wieder zurückgegriffen, indessen, wie die letztere Schrift zeigt, mehr aus spiritistischen als aus physikalischen Gründen.

[3]) Phil. Mag. (4) XVIII, p. 321 und 442, 1859; XIX, p. 89, 1860 u. f. Auch Principles of Mathematics and Physics, Cambridge 1869.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Eine empirische Grundlage hatten diese sich nun mehrenden Undulationstheorien der Kräfte in der Beobachtung einer sogenannten akustischen Anziehung und Abstossung, welche J. Guyot um das Jahr 1834 [1]) zuerst gemacht hatte. Guyot hängte in der Nähe eines transversal schwingenden Stabes ein kleines Papierquadrat an einem Faden auf und fand, dass das Papier angezogen wurde, wenn seine Ebene der Ebene der Schwingungen parallel war, dagegen abgestossen wurde, wenn diese Ebenen senkrecht auf einander standen. Die Wirkungen waren bis auf eine Entfernung von neun Linien bemerkbar. Indessen kam Guyot selbst erst nach den Arbeiten von Challis auf diese Ideen zurück und schrieb dann im Jahre 1861 [2]) alle Attractionen und Repulsionen der ponderablen Theile den Verdünnungen oder Verdichtungen des Aethers zwischen ihnen zu, die durch transversale Schwingungen desselben hervorgerufen seien. Schellbach leitete dann im Jahre 1870 [3]) durch Beobachtungen von Gasballons in tönender Luft das Gesetz ab, dass die Schallschwingungen eines elastischen Mittels specifisch schwerere Körper nach dem Mittelpunkte der Erschütterung hinziehen, specifisch leichtere Körper aber davon abstossen. Č. Dvořák endlich zeigte 1878 [4]), dass Resonatoren unter bestimmten Umständen von den Schallquellen abgestossen werden, und construirte sogar ein akustisches Rotationsrad. Danach ist man auch immer wieder auf die translatorischen Kräfte der Wellenbewegungen zurückgekommen, wovon wir noch weiter zu berichten haben werden.

Nicht aus transversalen, sondern aus longitudinalen Schwingungen des Aethers versuchten im Jahre 1863 F. A. E. und Em. Keller [5]) und 1869 auch Lecoq de Boisbaudran [6]) die Gravitation abzuleiten. Nach dem letzteren werden die auf ponderable Materien auftreffenden Longitudinalschwingungen des Aethers zum Theil in transversale Licht- oder Wärmeschwingungen umgesetzt und so in ihrer Wirkung gegen die übrigen auftreffenden longitudinalen Schwingungen geschwächt. Da diese Schwächung zwischen zwei ponderablen

[1]) Ann. de chim. et de phys. (2) LV, p. 200, 1834; Pogg. Ann. XXXI, S. 640, 1834; Des mouvements de l'air et des pressions de l'air en mouvements, Paris 1835.

[2]) Presse scientifique III, p. 130, 1861.

[3]) Pogg. Ann. CXXXIX, S. 670; CXL, S. 325, 1870. Mit den Beobachtungen an den Ballons stimmten auch die anderen, dass an der Mündung eines Resonanzkastens, auf dem eine tönende Stimmgabel stand, eine Hollundermarkkugel angezogen, eine Flamme aber abgestossen wurde. — K. H. Schellbach, geb. am 25. Dec. 1805 in Eisleben, Prof. am Friedrich-Wilhelms-Gymnasium in Berlin.

[4]) Wiedemann's Ann. III, S. 328, 1878. Auch F. Guthrie beschäftigte sich um dieselbe Zeit (Phil. Mag. XXXIX, p. 309; XL, p. 345, 1870) mit den akustischen Anziehungen.

[5]) Compt. rend. LVI, p. 530, 1863.

[6]) Ibid. LXIX, p. 703, 1869.

Atomen stärker ist als anderwärts, so werden diese Atome durch die äusseren Aetherschwingungen wie von einer Anziehungskraft zu einander hingetrieben. C. Puschl[1]) kam zu dem Resultat, dass die auf einen Körper auftreffenden Aetherschwingungen je nach ihrer Art verschiedene Kräfte äussern, die transversalen Schwingungen nämlich, weil sie die Abstände der Theile vergrössern, einen Zug, die longitudinalen Schwingungen dagegen eine Abstossung hervorbringen müssen. Jeder warme Körper im Himmelsraume wird also durch die von ihm ausgehenden Wärmestrahlen eine scheinbare Anziehung hervorrufen. Indessen ist diese thermogene Anziehung, da sie der Oberfläche der angezogenen Körper direct, der Masse aber indirect proportional wirkt, für Körper mit bedeutenden Massen nur gering und die von der Sonne auf die Erde ausgeübte thermogene Anziehung jedenfalls nur ein sehr kleiner Theil der Gravitation.

Um dieselbe Zeit hatte Leray[2]) den Undulationstheorien der Gravitation auch wieder eine Aetherstosstheorie ganz in der Weise von Lesage gegenüber gestellt, indem er annahm, dass durch jeden Punkt des Raumes unzählige, nach allen Seiten gerichtete Aetherströme hindurchgingen, deren Bewegungen beim Durchströmen durch ponderable Materien nach dem Verhältniss der Massen derselben absorbirt würden. Direct auf das System von Lesage aber ging W. Thomson um das Jahr 1872[3]) zurück, und mit ihm schloss sich danach auch G. Tait[4]) ganz der Gravitationstheorie dieses Physikers an. Thomson hält nur insofern das System von Lesage für der Verbesserung bedürftig, als man nicht mit Lesage annehmen kann, dass die Energie der schwer machenden Körperchen, der Aetheratome, durch die Zusammenstösse der Atome sich nach und nach, wenn auch nur um ein sehr Geringes, vermindert, sondern vielmehr nach einem Ersatz für diese Energie suchen muss. Er führt zu dem Zwecke die Annahme ein, die Clausius schon in seiner Gastheorie gemacht hat, dass nämlich die Energie der translatorischen Bewegung nicht die ganze Energie der Atome darstellt, dass vielmehr ein Theil der Gesammtenergie auch aus vibratorischer und rotatorischer Energie besteht und dass diese verschiedenen Arten der Energie in einander umwandelbar sind. Nach dieser Einfügung aber scheint ihm die corpusculare Theorie der Gravitation nicht mehr Schwierigkeiten zu bieten, als die kinetische Gastheorie[5]).

---

[1]) Wiener akad. Berichte IX, S. 173, 1852; XV, S. 279, 1855; LXI, 2. Abtheilung, S. 299, 1870.

[2]) Compt. rend. LXIX, p. 615, 1869.

[3]) Proceed. of the Roy. Soc. of Edinburgh VII, p. 577, 1872.

[4]) Vorlesungen über einige neuere Fortschritte der Physik, Braunschweig 1877, S. 248.

[5]) Thomson sagt wörtlich (Proc. of the R. S. of Edinb. VII, p. 588): „The corpuscular theory of gravity is no more difficult in allowance of its fundamental assumptions than the kinetic theory of gases as at present received, and it is more complete, in as much as from fundamental assumptions of an

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Nach dem Eintreten so vieler Physiker [1]) und so gewichtiger Autoritäten wie Thomson und Tait für die kinetische Theorie der Gravitation fühlten sich auch die anderen Physiker angeregt, zu dieser Frage Stellung zu nehmen, kamen aber dabei in den meisten Fällen nur zu einer mehr oder weniger wohlwollenden Neutralität. Da Niemand die Newton'schen Gesetze der Schwerkraft leugnete, so war auch das reelle Dasein dieser Kraft, die man höchstens nur mit falschen Namen bezeichnete, niemals in Frage gestellt; Astronomen und Physikomathematiker vor Allem, die sich nur mit den Wirkungen derselben beschäftigten, betrachteten darum die Frage nach der causa gravitatis als ausserhalb ihrer Sphäre liegend und wussten derselben kein weiteres Interesse abzugewinnen. Doch gab es auch andere Physiker, die aus mancherlei Gründen an der Gravitation als an einer Urkraft stricte festhielten und jede Möglichkeit einer weiteren Ursache derselben leugneten. Der eifrigste unter diesen war Zöllner [2]), und doch vermochte auch dieser nicht, die alten Ansichten ganz unverändert zu lassen.

Zöllner war ein unbedingter Anhänger des Weber'schen elektrischen Grundgesetzes, nach dem die Wirkung zweier elektrischen Theilchen auf einander nicht bloss von den Massen und der Entfernung, sondern auch von der Geschwindigkeit und sogar der Beschleunigung der wirkenden Theile abhängt. Da nun Zöllner dabei auch an der Geltung des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft und damit an der vollständigen Einheit aller Naturkräfte festhielt, so blieb ihm nichts Anderes übrig, als für die Gravitation, die sonst ihren alten Charakter als einer elementaren Wirkung in die Ferne vollständig behalten sollte, ebenfalls eine Abhängigkeit von dem Bewegungszustande der gravitirenden Körper anzunehmen und so das Gravitationsgesetz mit dem elektrischen Grundgesetz zu identificiren. Weber hatte auch in seiner ersten Abhandlung von 1846 selbst noch bemerkt, dass eine Ausdehnung seines Gesetzes auf die Gravitation in den berechneten Werthen der Bewegungen ponderabler Massen und selbst der Himmelskörper nur vollständig ausserhalb unserer Wahrnehmung fallende Abweichungen ergeben könnte. C. Seeger führte die betreffenden Entwickelungen für die Bewegungen und Störungen der Planeten 1864 [3]) wirklich aus, gab aber keine nume-

---

extremely simple character it explains all the known phenomena of its subject, which cannot be said of the kinetic theory of gases so far as it has hitherto advanced."

[1]) Wir haben nur einen geringen Theil der in dieser Zeit erschienenen Abhandlungen meist kleineren Umfangs über die Ursache der Gravitation erwähnen können, principiell über das Erwähnte Hinausgehendes haben dieselben nicht gebracht.

[2]) Joh. Karl Friedr. Zöllner (8. Nov. 1834 Berlin — 25. April 1882 Leipzig), Professor der Astrophysik in Leipzig; seit Anfang der siebziger Jahre eifriger Anhänger des Spiritismus.

[3]) De motu perturbationibusque planetarum secundum legem electrodynamicam Weberianam solem ambientium, Göttingen 1864.

rischen Resultate. Solche theilte zuerst Zöllner in seinem Buche: „Ueber die Natur der Cometen" (Leipzig 1872) nach Prof. Scheibner's Rechnungen mit. Bei Benutzung des Weber'schen statt des Newton'schen Gesetzes und Beibehaltung des Weber'schen Werthes der Constante $c$ würde man danach für die Bewegung des Mercurs allerdings noch kleine Differenzen, wie eine säculare Aenderung des Perihels von 6,75 Bogensecunden, erhalten, für die Venus aber würde die entsprechende Aenderung nur 1,43 Bogensecunden betragen und für die anderen Planeten gänzlich verschwinden [1]. Zöllner zog daraus den Schluss, dass man die Gravitation mit den elektrischen Kräften nicht bloss in den Gesetzen ihrer Wirkung, sondern in ihrem Wesen selbst identificiren könnte. Er nahm danach an, dass den Massentheilchen ausser der Trägheit und der Undurchdringlichkeit nur die Kräfte der ungleichartigen Elektricitäten zukämen, und um aus diesen Kräften auch die Gravitation ableiten zu können, setzte er [2] noch voraus, dass das attractive Potential zweier ungleichartigen Elektricitätstheilchen um ein sehr Geringes $\left(\text{weniger als } \frac{1}{6 \cdot 10^{40}}\right)$ grösser sei, als das repulsive Potential zweier gleichartigen. Die Naturkräfte behielten so die alte Natur als elementare, unmittelbar in die Ferne wirkende Ursachen vollständig bei, und nur ihre Unabhängigkeit von dem Bewegungszustande der wirkenden Massen erklärte Zöllner für unmöglich. Nach dem Newton'schen Anziehungsgesetze haben nämlich zwei in der Entfernung $r$ befindliche Atome, deren Massen $m$ und $m'$ sind, das Potential $\frac{m m'}{r}$. Nimmt man nun, wie es in der mathematischen Physik allgemein üblich ist, diese Massen als Punkte an, so können dieselben bis auf unendlich kleine Entfernungen sich einander nähern, ihr Potential kann daher einen unendlich grossen Werth erreichen, und in jeder endlichen Menge von ponderabler Materie müsste also eine unbegrenzte Summe potentieller Energie, eine unendlich grosse Arbeitsfähigkeit enthalten sein. Da dies unmöglich ist, so kann das Newton'sche Attractionsgesetz nur als eine erste Annäherung an das wahre, das Weber'sche Gesetz, angesehen werden. Nach diesem ist das Potential der beiden Massen nur $\frac{m \cdot m'}{r}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$, und diese Formel zeigt, dass das Wachsen desselben bei der Verkleinerung der Entfernung immer mehr aufgewogen wird durch die Vergrösserung der Geschwindigkeit $v$, so dass der Potentialwerth nur einen endlichen Maximalwerth erreichen kann, der von der Weber'schen Constanten $c$ abhängt.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

[1] Zu fast ganz gleichen Resultaten kam Tisserand in der Abhandlung: Sur le mouvement des planètes autour du soleil d'après la loi électrodynamique de Weber (Compt. rend. LXXV, p. 760, 1872.)

[2] Principien einer elektrodynamischen Theorie der Materie, Leipzig 1876, S. XII.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Zöllner vertheidigt Newton in der Aufstellung seines Gesetzes, indem er bemerkt, dass Newton dasselbe nur für Körper in messbaren Abständen angewandt und so der Weber'schen Correction nicht bedurft hätte, betont aber zugleich, dass man jetzt, wo man dasselbe auf Atome in unmessbar kleinen Entfernungen anwenden wolle, jedenfalls die Weber'sche Form des Gesetzes allein gebrauchen dürfe [1]). Merkwürdig bleibt dabei, dass Zöllner den inneren, unauflöslichen Widerspruch zwischen der von ihm beibehaltenen unmittelbaren Wirkung in die Ferne und der von ihm angenommenen Abhängigkeit der Wirkung von dem Bewegungszustande nicht bemerkte oder doch nicht beachtete. Erklärt wird dies nur dadurch, dass Zöllner für alle materielle unmittelbare Wirkung in die Ferne doch eine Ursache, nur nicht eine materielle, sondern eine immaterielle annahm und dass ihn gerade dieses scheinbare Wirksamwerden des Uebersinnlichen besonders anzog. Zöllner sah auch in der Anziehung zweier Körper auf einander nicht eine blosse Zugkraft, die von aussen auf die Materie wirkt, sondern vielmehr ein Streben der Körper nach Vereinigung, das im Inneren eines jeden Körpers selbst begründet liegt. Ja, schärfer denkend als mancher Andere, der schon in diesem Streben die Lösung des Räthsels zu haben meinte, betonte er ausdrücklich, dass ein Streben zweier Körper zur Vereinigung nicht ohne eine gegenseitige Empfindung derselben möglich sei, und schrieb danach aller Materie Empfindungen und Gefühle der Lust oder der Unlust zu, die dann erst anziehende oder abstossende Triebe in derselben auslösen sollten [2]). In diesen Annahmen stand Zöllner auch nicht allein, vielmehr haben eine Anzahl von Philosophen und Physiologen, direct an Leibniz und seine Monadenlehre anknüpfend, versucht, die Räthsel der psychischen Erscheinungen der organischen Wesen für ihr Gebiet wenigstens dadurch zu lösen, dass sie eine Beseelung aller, auch der unorganischen Materie annahmen [3]). Die Physiker haben indess in einer solchen Vergeistigung der Materie keine Erklärung der unmittelbar in die Ferne wirkenden Kräfte, sondern mehr eine

---

[1]) Principien einer elektrodyn. Theorie der Materie, Leipzig 1876, S. XIX.

[2]) Ibid., S. XLV bis LXVII.

[3]) So sagt Lotze in seinem Mikrokosmos, Leipzig 1877, I, S. 398: „Jeder Druck und jede Spannung, welche die Materie erleidet, die Ruhe des sicheren Gleichgewichtes wie die Trennung früherer Zusammenhänge, alles dieses geschieht nicht nur, sondern ist geschehend zugleich der Gegenstand eines Genusses." Häckel schreibt in seiner „Perigenesis der Plastidule", Berlin 1876, S. 37: „Lust und Unlust, Begierde und Abneigung, Anziehung und Abstossung müssen allen Massen und Atomen gemeinsam sein; denn die Bewegungen der Atome, die bei Bildung und Auflösung einer jeden chemischen Verbindung stattfinden müssen, sind nur erklärbar, wenn wir ihnen Empfindung und Willen beilegen."

Steigerung des Räthselhaften derselben ins Wunderbare gesehen, und die Versuche einer kinetischen Erklärung der Gravitation haben danach keine Verminderung, sondern eher eine Vermehrung erfahren.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Die bisherigen Arbeiten auf diesem Gebiete hatten alle denkbaren Möglichkeiten schon erschöpft. Eine durch ein Zwischenmedium vermittelte Wirkung eines Körpers auf einen entfernten kann entweder in einem Druck oder in einem Stoss bestehen, und für den letzteren Fall ist besonders zu entscheiden, ob der Druck durch translatorische oder vibratorische Bewegungen der Theile das Mediums fortgepflanzt wird. Alle diese Möglichkeiten wurden nun auch in den siebziger und achtziger Jahren wieder und in breiterer und tieferer Weise als früher behandelt.

Die Aetherdrucktheorien der Gravitation schienen dabei am nächsten zu liegen. Ph. Spiller, der schon seit dem Jahre 1855 bemüht gewesen war, alle physikalischen Erscheinungen aus einem Princip zu erklären und das „Phantom der Imponderabilien“ zu verscheuchen, brachte seine Untersuchungen 1876 [1]) auf diesem Fundamente zum Abschluss. Nach ihm ist der ganze Weltenraum von einem atomistisch zusammengesetzten, vollkommen elastischen Aether erfüllt, der sich an allen Orten in einer nach allen Richtungen gleichen Spannung befindet oder überall unter gleichem Drucke steht. Für zwei in diesem Aether befindliche, kugelförmige, ponderable Atome sollen dann alle Druckkräfte, welche innerhalb zweier in den Mittelpunkten der Atome senkrecht auf ihrer Verbindungslinie stehenden Ebenen wirken, sich ausgleichen, und die ausserhalb dieser Ebenen wirkenden Druckkräfte, die keinen Gegendruck finden, sollen dann die scheinbare Gravitation der beiden Atome erzeugen. Isenkrahe zeigte indess in seiner gleich zu erwähnenden Schrift „Das Räthsel von der Schwerkraft“, dass die Ausgleichung des Drucks, wie sie Spiller angenommen, nicht eintreten und dass in einer elastischen Flüssigkeit die Verbreitung des statischen Drucks durch keinen ruhenden Körper gehindert werden kann, wie das auch die Ausgleichung des Luftdruckes zwischen den festen Körpern zeigt [2]).

Mehr kinetisch fasste darum die Verbreitung des Aetherdrucks Aurel Anderssohn auf, der in der Schrift „Die Theorie vom Massendruck aus der Ferne“ (Breslau 1880) seine Ansichten ausführlich auseinandersetzte. Danach strahlt jeder kosmische Körper nach allen Seiten eine gewisse repulsive Kraft, eine Flieh- oder Centrifugalkraft, aus, die sich in dem Alles erfüllenden und Alles durchdringenden Aether bis in jede Entfernung fortpflanzt. Die Ausbreitung des Drucks

---

[1]) Die Urkraft des Weltalls, Berlin 1876. — Ph. Spiller, 1800 bis 1879, Professor in Berlin.

[2]) Das Räthsel von der Schwerkraft, Braunschweig 1879, S. 44 bis 49.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

geschieht aber nicht wie bei Spiller ohne Bewegung, sondern stossweise durch Wellenbewegungen des Aethers, die nur so schnell erfolgen, dass man die Stosswirkungen derselben auch als continuirlichen Druck bezeichnen kann. Da nun jeder kosmische Körper auf allen Seiten von anderen kosmischen Körpern umgeben ist, so erleidet ein solcher Körper von allen Seiten her einen Druck, der, von dem Körper selbst aus betrachtet, als eine Centripetalkraft, als eine Attraction desselben erscheint. Anderssohn's Theorie erweist sich als eine directe Umkehrung der Gravitationshypothese, vor der sie aber die anschauliche Vermittelung der Wirkungen und das Analogon der von den wärmeren Körpern ausgehenden Licht- und Wärmestrahlen für sich hat. Dafür aber bleibt auch bei seiner Theorie wie bei der Newton'schen die eigentliche Quelle der Wirkung unfassbar, und die Zusammensetzung der nach allen Seiten gleichen irdischen Gravitation wie die der Molecularattraction aus unendlich vielen Druckcomponenten ist jedenfalls eine schwer anschauliche Vorstellung. Man hat darum mehr und mehr versucht, die Ursache der Gravitation nicht sowohl in die ponderable Materie selbst als vielmehr in den Aether oder die Materie überhaupt zu verlegen.

Einer der radicalsten Neuerer auf diesem Gebiete ist N. Dellingshausen, der seine Ansichten in verschiedenen Abhandlungen, immer modificirt und verschiedenen Angriffen gegenüber vielfach verbessert, zuletzt im Jahre 1884 dargestellt hat[1]). Hier definirt er die Materie als das allgemeine, allen Körpern zu Grunde liegende, unterschiedslose, unveränderliche und imponderable Substrat, in dem Unterschiede und Wechselwirkungen nur durch Bewegungen verursacht werden können und das auch nur als bewegt begriffen werden kann. Atome und Molecüle in dieser Materie vorauszusetzen, wäre eine willkürliche, unbegründete und auch zwecklose Hypothese, die Materie ist also (wenigstens in der Negation willkürlich gesetzter Grenzen) als durchaus continuirlich zu fassen. Zu einem deductiven Aufbau der Welterscheinungen hätte man nun vor Allem die Kenntniss der inneren Bewegungen dieser Materie nöthig, da diese aber nicht direct erkannt werden können, so muss man aus den äusseren Bewegungen auf die inneren schliessen[2]). Licht- und Wärmeerscheinungen zeigen, dass

---

[1]) Kosmos, red. von B. Vetter, XIV, S. 267, 336, 427; XV, S. 35, 1884. Grundzüge einer Vibrationstheorie der Natur, Reval 1872; Das Räthsel der Gravitation, Heidelberg 1880. — Baron N. Dellingshausen auf Kattentack in Esthland.

[2]) Ohne Mathematik, sagt Dellingshausen, lässt sich hierin noch wenig leisten. Da es aber bei der Bildung eines Zusammenhanges unter den Naturerscheinungen weniger um die Formen der Bewegung, als um die Uebertragung und Umwandlung von Energie sich handelt, so hofft er doch zu einem Ziel kommen zu können. Freilich dürfte diese Hoffnung eine schwache sein, da auch die Transformation der Bewegungen vor Allem von ihrer Form abhängen wird.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

alle Materie in Schwingungen begriffen ist, die sich durch Wellenbewegungen in derselben fortpflanzen. Daraus darf man schliessen, dass die inneren Bewegungen der Materie, der Continuität wegen, kreisförmige sind, die sich aus einzelnen elementaren Schwingungen zusammensetzen. Indem diese inneren Bewegungen sich mit den äusseren bewegter Körper combiniren, werden sie zu Schraubenlinien, die sich immer wieder in rotatorische und translatorische Bewegungen zerlegen lassen. Jeder Punkt beschreibt dabei seine eigene Bahn, und niemals dürfen die Coordinaten zweier Punkte, auch wenn diese einander beliebig nahe liegen, für ein bestimmtes Zeitmoment einander gleich werden; die Punkte schliessen sich darum gegenseitig aus und begründen dadurch den Zustand, den man bisher als die Undurchdringlichkeit bezeichnet hat, der aber allein auf der Harmonie der inneren Bewegungen beruht [1]. In der Materie existirt keine Elasticität, sondern jeder Punkt schiebt und wird geschoben; auch ist kein Beharrungsvermögen erforderlich, um diese Bewegungen aufrecht zu erhalten, sondern ihre ununterbrochene Fortdauer beruht auf der vollkommenen Gegenseitigkeit aller Wechselwirkungen, wodurch ein einzelner Punkt nicht plötzlich stille stehen kann. Da wir uns von jedem Punkte des Raumes Schwingungen ausgehend denken können, so müssen auch in jedem Punkte des Raumes unendlich viele Wellenzüge zusammentreffen. Diese zusammentreffenden Wellen werden dann an manchen Stellen stehende Schwingungen erzeugen. Solche Theile des Raumes, in welchen gleiche, stehende Schwingungen stattfinden, haben dann eine gewisse Beständigkeit und Einheit, sie bilden die Körper. Die Grenz- oder Oberfläche eines Körpers ist eine Fläche, welche stehende Schwingungen von verschiedener Intensität und Dauer von einander trennt und an der also die die Körper durchströmenden Schwingungen reflectirt werden. Da die den Raum continuirlich erfüllende Materie weder ausgedehnt noch zusammengedrückt werden kann, so ist die Vergrösserung oder Verkleinerung des Volumens der Körper nur durch eine Ausbreitung oder Beschränkung der inneren Bewegungen auf einen grösseren oder geringeren Raum zu erklären [2];

---

[1] Das ist eine Behauptung, durch welche doch nichts weiter geschieht, als dass der Begriff der Undurchdringlichkeit umschrieben wird.

[2] Selbst die Fortbewegung der Körper ist nach der kinetischen Naturlehre nicht durch ein Fortbewegen von Materie, sondern nur durch ein Fortpflanzen von Bewegungen zu erklären. Eine ähnliche Hypothese hat G. Helm 1881 in Wiedemann's Annalen (XIV, S. 153) ausgesprochen: „Ich nehme also an, dass die Molecüle kleine Volumina (in isotropen Körpern, von denen allein die Rede ist, Kugeln) seien, die mit demselben Stoffe, dem Aether, erfüllt sind, der sich auch ausserhalb derselben, den ganzen Raum stetig erfüllend, befindet. Dieser Stoff besitzt einen anderen Grad der Beweglichkeit im freien Weltenraume, einen anderen in der Nähe der Molecüle, einen anderen in den Molecülen. Ausserhalb der Molecüle bewegt sich dieser Stoff

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

dass dabei Arbeit consumirt oder auch producirt werden muss, ist selbstverständlich. Der wichtigste Punkt für die „kinetische Naturlehre“, wie Dellingshausen seine Theorie bezeichnet, ist die Erklärung der potentiellen Energie, die als Energie der Lage, chemische Energie etc. den Körpern innewohnt. Die Anhänger der alten Gravitationstheorie leiten solche in den Körpern vorhandenen Arbeitsvorräthe von Centralkräften ab, ohne anzugeben, auf welche Weise dieselben zur Wirksamkeit gelangen. Die Aetherstosstheorien glauben die potentielle Energie ganz entbehren zu können und müssen deswegen auf die Erklärung vieler Naturerscheinungen verzichten. Erst in der kinetischen Naturlehre lässt sich, nach Dellingshausen, die wahre Bedeutung der potentiellen Energie klar und anschaulich nachweisen, denn es ist gar nicht zu verkennen, dass diese Energie nichts Anderes als die Energie der in den Körpern interferirenden und sich in ihren Wirkungen nach aussen gegenseitig neutralisirenden Bewegungen ist. So treten z. B. die während der Veränderung des Aggregatzustandes den Körpern als Wärme zugeführten Bewegungen in einen Zustand des beständigen Interferirens ein und gehen dadurch für das Gefühl und das Thermometer verloren, d. h. die zugeführte Wärme wird in potentielle Energie umgewandelt. Bei der Condensation der Dämpfe aber treten umgekehrt die inneren Bewegungen aus ihren Interferenzen hervor; ebenso ist der Arbeitsvorrath, welcher die Explosion des Knallgases und die Verbrennungswärme des Wasserstoffs hervorbringt, in den Bestandtheilen des Wassers bereits vor ihrer Vereinigung als die Energie der interferirenden Bewegungen enthalten und tritt bei der gegenseitigen Vereinigung der Gase nur aus den Interferenzen heraus. Auch die Elektricitäten bestehen in inneren Bewegungen, die im gewöhnlichen Zustande sich gegenseitig durch Interferenz neutralisiren, deren Interferenz aber durch Reibung oder chemische Processe gestört wird [1]).

---

gemäss den Differentialgleichungen des elastisch flüssigen Körpers, aber die Constanten der Bewegungsgleichungen sind verschieden im freien Weltraume und in der Nähe der Molecüle . . . In den Molecülen, nehme ich an, bewegt sich der Stoff nach den Differentialgleichungen des flüssigen Körpers . . . Ich werde kurz den Aether ausserhalb der Molecüle als fest, den in ihnen als flüssig bezeichnen . . . Ich kann dann kurz das Molecül als eine Stelle im Raume bezeichnen, wo der Aether verflüssigt wird; bewegt es sich, so bewegt sich die Ursache dieser Verflüssigung, und Stellen, die vorher fest waren, werden flüssig, und umgekehrt.“

[1]) Seine Definition der potentiellen Energie als die Energie der interferirenden Bewegungen hält Dellingshausen für eine bleibende Errungenschaft und führt dieselbe gegen die kinetische Atomistik und die Aetherstosstheorie an, die einer solchen Erklärung nicht fähig seien. Das Letztere wohl mit Unrecht, denn auch jene beiden können für die potentielle Energie innere Bewegungen annehmen, die bei der unvollständigen Raumerfüllung, die diese Theorien voraussetzen, nicht nach aussen zu wirken brauchen. Nur die Auslösung der potentiellen Energie, die Umwandlung derselben

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Das seinem Wesen nach unbekannte Substrat der Materie liegt auch dem Weltäther zu Grunde, der als ein Gas, vielleicht das vollkommenste aller Gase [1]), zu fassen ist, das sich auf einer dem absoluten Nullpunkte nahen Temperatur und unter sehr geringem Drucke befindet. Danach müssen die in ihm vorhandenen Bewegungen in jedem Punkte sich so neutralisiren, dass die Bewegungen stehende werden, d. h. der Weltäther muss ein in stehenden Schwingungen begriffenes Medium sein, das wegen seiner ausschliesslich potentiellen Energie uns als leer und widerstandslos erscheint. Befände sich im Raume nur der Aether, so würde dieser Zustand auch bis ins Ewige fortdauern, die Körper aber, die in ihm vertheilt sind, werden diesen Zustand nothwendig ändern; denn indem sie die Licht- und Wärmewellen, überhaupt alle Aetherwellen, die auf sie eindringen, absorbiren und in innere Bewegungen umwandeln, die nicht weiter nach aussen wirken, entziehen sie den anderen Aetherwellen die zur Bildung stehender Wellen unentbehrlichen Componenten und zwingen sie dadurch, als fortschreitende Wellen weiter zu bestehen. Der Weltäther erleidet somit unter dem Einfluss der Weltkörper eine tief eingreifende Veränderung; er befindet sich nun nicht mehr in ausschliesslich stehenden Schwingungen, sondern wird in bestimmten, nach den verschiedenen Weltkörpern hin convergirenden und sich vielfach kreuzenden Richtungen von fortschreitenden Wellen durchlaufen, welche eine Gravitation nach diesen Weltkörpern hin erzeugen. Indessen sind es nicht diese Gravitationswellen, welche die lebendige Kraft beim Zusammenfallen der Körper liefern, vielmehr bilden sie nur die Veranlassung für das Fallen; sie lösen, indem sie die stehenden Schwingungen im Inneren der Körper stören, nur diejenigen Kräfte aus, welche die beschleunigte Fallbewegung hervorbringen. So ist also, was wohl zu bemerken, der Aether nicht die Ursache der Gravitation, sondern nur die Veranlassung, welche die den Körpern selbst eigene Energie auslöst, d. h. ihre potentielle Energie in kinetische Energie der Fallbewegung umwandelt [2]). Dabei muss aber doch die Energie des Falles der

in actuelle, scheint bei Dellingshausen leichter zu verstehen, als in der kinetischen Atomistik.

[1]) Ueber die Unterschiede der Aggregatzustände lässt sich Dellingshausen nicht weiter aus, und es ist schwer zu sehen, wie dieselben nach seiner Theorie zu begreifen sind.

[2]) Dellingshausen macht diese verwickelte Construction, weil er den Aetherstosstheorien den seiner Meinung nach vernichtenden Vorwurf macht, dass nach ihren Voraussetzungen die Energie, welche die ganz gleichmässig fliessenden Aetherströme dem fallenden Körper mittheilen, der Zeit proportional sein müsste, während sie doch, wie bekannt, mit dem Quadrate der Zeit wächst. Ganz in derselben Weise wie den Aetherstosstheorien könnte man aber den Vorwurf auch allen älteren Theorien der Gravitation, den Entwickelungen von Galilei, Newton etc., ja schliesslich auch denen von Dellingshausen selbst machen; denn wenn auch die fallenden Körper ihre actuelle Energie aus sich selbst ent-

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Energie der Gravitationswellen proportional sein, denn die Energie dieser Gravitationswellen wird jedenfalls von der Absorptionsfähigkeit ihres Centralkörpers für fortschreitende Wellen abhängen. Aus den gleichen Fallbeschleunigungen, welche alle Körper auf der Erde erhalten, muss geschlossen werden, dass die ponderablen Körper aus den sie durchströmenden Gravitationswellen Mengen von Energie entnehmen, die ihren Massen proportional sind, und da dieser Schluss ganz allgemein anwendbar ist, so darf man auch allgemein das Gesetz aussprechen, dass die Energie der Gravitationswellen stets der Masse ihres Centralkörpers proportional sein muss [1]. Von den concentrisch von einem Mittelpunkte ausströmenden Gravitationswellen kann nur der Theil seine schwer machende Wirkung ausüben, der auf einen ponderablen Körper trifft; indem nun diese Wellen bei ihrer Fortpflanzung nach einem bestimmten Weltkörper hin ihre Bewegungen auf beständig grösser werdende Kugelflächen übertragen, nimmt ihre Energie auf gleich grossem Flächenabschnitte oder innerhalb gleicher Volumina in einem zu den Quadraten der Halbmesser der Kugeln oder den Quadraten der Entfernungen von dem Mittelpunkte der Centralkörper umgekehrten Verhältniss ab. Damit ist also bewiesen, dass auch nach der kinetischen Naturlehre die Körper in ihren Bewegungen den Newtonianischen Gesetzen gehorchen.

Dellingshausen sagt am Schluss seiner Arbeit [2]: „Die Naturerscheinungen sind Bewegungserscheinungen. Das ist die Einheit der Naturerkenntniss. Die Vielfältigkeit der

---

wickeln, so wäre auch dabei noch eher anzunehmen, dass dies proportional der Zeit selbst, als proportional dem Quadrate derselben geschähe. Die Schwierigkeit, die Dellingshausen hier findet, ist überall dieselbe und liegt nur darin, dass er die Energie als das Primitive nimmt, was beim Stoss übertragen und beim Fallen entwickelt wird, während wir in erster Linie nur von einer Bildung von Geschwindigkeitsdifferenzen reden können, die proportional der Zeit geschieht und eben damit das quadratische Wachsen der Energie bedingt.

[1]) Der Begriff der Masse hat für Dellingshausen bei der Homogenität seiner Materie natürlich seine besonderen Schwierigkeiten, er ersetzt ihn durch den Begriff der Bewegungsquantität des Körpers. Da aber die gewöhnliche Definition der letzteren doch wieder die Masse enthält, so erklärt er die Bewegungsquantität nur als das Product aus Geschwindigkeit, Volumen und einem constanten Factor, und weil dieser Factor doch nichts ist, als die wieder von dem Begriffe der Masse abhängende Dichtigkeit, so bezeichnet er schliesslich die Massen nur als „empirische, durch das beobachtete Gewicht bestimmte Coëfficienten, welche dazu dienen, die Aequivalenz zwischen der Arbeitsleistung und lebendigen Kraft der Körper herzustellen". (Kosmos XIV, S. 439.) Damit ist allerdings das Wesen der Masse richtig begriffen, eine Ableitung desselben aus dem aufgestellten Begriffe der Materie aber jedenfalls nicht gegeben, ja nicht einmal die Möglichkeit einer solchen plausibel gemacht, was der Schwierigkeit wegen gerade für eine Theorie der continuirlichen Raumerfüllung der Materie nothwendig wäre.

[2]) Kosmos XV, S. 43.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Erscheinungen beruht auf der Verschiedenheit der Bewegungen, die auch entstehen und vergehen können. Unvergänglich ist nur die Energie . . . Das Endziel aller Naturforschung müsste nun allerdings darin bestehen, nicht allein die Aequivalenz der Verwandlungen nachzuweisen, sondern auch, wie solches bereits in der Undulationstheorie des Lichtes geschehen ist, die Art der Bewegungen in den Körpern zu erkennen. Von diesem Ziele ist jedoch die Wissenschaft, schon wegen der Mannigfaltigkeit der Erscheinungen, noch weit entfernt; auch lässt sich die hier gestellte Aufgabe nur mit Hülfe der Mathematik erfüllen." Trotz dieser eingestandenen Unvollkommenheit seiner Theorie hat er doch das Bewusstsein, auf dem Wege der richtigen Naturerkenntniss ein gutes Stück zurückgelegt zu haben. „Der Niedergang der Atomistik, so prophezeit er weiterhin [1]), ist von nun an mit Sicherheit vorherzusagen . . . Die künftigen Naturforscher werden . . . die Atomistik verlassen und sich derjenigen Lehre zuwenden, welche ohne künstliche Hülfsmittel, ohne Atome, ohne Kräfte und Imponderabilien dennoch das zu leisten vermag, woran die atomistische Theorie seit 3000 Jahren vergebens gearbeitet hat. Diese Lehre ist aber die reine kinetische Naturlehre, wie sie in dieser Abhandlung vorgetragen worden ist . . . Die nächste Aufgabe der kinetischen Naturlehre besteht aber darin, das in dieser Abhandlung mit Worten Gesagte in mathematischer Form zu wiederholen."

Dellingshausen möchte mit seiner Prophezeiung Recht haben, wenn nur die letztere Forderung ebenso leicht erfüllt als ausgesprochen wäre. Seine Arbeit enthält viel Richtiges und hat viele Vorzüge. Die Construction der Materie rein aus Bewegungen erscheint als Ideal der Physik, seine Erklärung der potentiellen Energie, die Constitution der Körper ohne jede elementare Kraftwirkung sind bedeutende Leistungen. Dafür ist nicht bloss seine ganze Theorie selbst so wenig mathematisch, sondern sie bietet auch der mathematischen Behandlung so wenig anschauliche Grundlagen, dass an eine mathematische Bewahrheitung derselben kaum zu denken ist. Entgegen seinen Worten hat Dellingshausen in dieser Beziehung entschieden nicht das geboten, was die alte Naturwissenschaft mit ihren Atomen, Kräften und Imponderabilien geleistet hat. Die Bewegung eines einzelnen Atoms im leeren Raume ist leicht zu begreifen und ebenso leicht mathematisch zu behandeln; wie aber in Dellingshausen's homogener, unzusammendrückbarer, continuirlicher Materie einzelne Bewegungen auch nur möglich sein sollen, darüber hat er selbst sich nicht einmal weiter verbreitet. Bevor aber nicht der Mathematiker die Wellenbewegungen und die Interferenzen derselben in Dellingshausen's Materie aus den einfachen Bewegungsgleichungen abgeleitet hat, eher wird auch den Physikern nicht die ganze Theorie als mehr denn ein Product dichtender Phantasie erscheinen.

---

[1]) Kosmos XV, S. 49.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Zu den Physikern, die, wie Dellingshausen, die Gravitation aus Schwingungen der Materie ableiten, gehören übrigens auch S. Tolver Preston [1]) und Hugo Fritsch [2]), beide aber sind, im Gegensatze zu Dellingshausen, Atomistiker und nehmen zwei ursprüngliche Materien, die schwer machende, den Aether, und die schwere oder ponderable Materie, an. Der Letztere versucht dabei die Klippe elastischer Atome zu vermeiden, indem er die Atome als absolut starr, d. h. in ihrer Gestalt unveränderlich, voraussetzt.

Eine eigenthümliche Stellung zwischen den Druck- und den Undulationstheorien der Gravitation, beide gewissermaassen verbindend, versucht A. Secchi [3]) einzunehmen, der ähnlich wie Dellingshausen tiefer als die Vorigen auf das Problem der Constitution der Materie eingeht, dafür aber als Atomistiker wieder dem Letzteren direct gegenüber steht. Nach Secchi ist der Raum discontinuirlich, von isolirten, unabhängigen und undurchdringlichen Atomen erfüllt, die der Bewegung fähig sind, denen aber durchaus keine innere Kraft, weder eine elastische noch repulsive, innewohnt. Diese Atome haben nicht allein eine translatorische, sondern auch eine rotatorische Bewegung. Da nun Poinsot [4]) gezeigt hat, dass

---

[1]) Physics of the Ether, London 1875.

[2]) Programm der Realschule in Königsberg, 1874 und 1876. Im Jahre 1886 (Programm des städt. Realgymn. in Königsberg) hat Fritsch seine Ansichten noch einmal in theilweise veränderter Form dargestellt, die wohl durch die mittlerweile erschienenen Arbeiten mit veranlasst ist. Danach erfüllen alle materiellen Theilchen den Raum ohne Zwischenräume. Die Aethertheilchen sind nicht fest, sondern können beim Aufeinandertreffen weiter sich zertheilen. Die viel grösseren schweren Massentheilchen erhalten ihre Starrheit nur durch die Stösse der Aethertheilchen. Die scheinbare Elasticität rührt davon her, dass in der undurchdringlichen Materie keine Bewegung verschwinden kann.

[3]) L'unità delle forze fisiche, zum ersten Male erschienen 1864; ins Deutsche übersetzt: Die Einheit der Naturkräfte, Leipzig 1876. — Angelo Secchi, geb. am 19. Juli 1818 zu Reggio in der Aemilia, wurde in der Jesuitenschule seiner Vaterstadt erzogen und trat 1833 in die Gesellschaft Jesu ein, erhielt seine wissenschaftliche Ausbildung im Collegio Illirico-Lauretano zu Loretto und in Georgetown in Nord-Amerika, ward Professor der Mathematik und Physik in Georgetown, dann am Collegio Romano und in Loretto, nach der Vertreibung der Jesuiten aus Italien hielt er sich in Stonyhurst in England und wieder in Georgetown auf, nach ihrer Rückkehr wurde er Professor der Astronomie am Collegio Romano und Director der Sternwarte, später auch Professor der physischen Astronomie an der Universität Rom, er starb daselbst am 26. Februar 1878.

[4]) Dynamische Untersuchungen über den Stoss der Körper, Liouville's Journal 1857, p. 281; übersetzt in Schlömilch's Zeitschr. f. Math. u. Physik III, S. 143 und 274, 1858. Poinsot sagt in dieser Abhandlung (Zeitschr. f. Math. u. Physik III, S. 164): „Es ist in der That höchst merkwürdig, dass ein vollkommen unelastischer Körper durch seine Bewegung allein gewissermaassen eine Art von Elasticität erlangen kann, so dass beim Zusammentreffen mit einem Hinderniss sein Schwerpunkt in einem der ursprünglichen Bewegungsrichtung entgegengesetzten Sinne zurückprallt, oder auch mit einer neuen Geschwindigkeit vorwärts geschleudert wird, gerade so, als wäre er mit einer Feder in Berührung gekommen. Nicht minder verdient es beachtet zu werden,

feste, nicht elastische Körper, welche mit Rotationen begabt sind, beim Stosse von einander wie elastische Körper, ja oft mit grösserer Geschwindigkeit als beim elastischen Stosse zurückgeworfen werden, so können auch die angenommenen unelastischen Atome doch in ihren Zusammenstössen die Erscheinungen vollkommener Elasticität zeigen [1]). Nimmt man nun an, dass in einem von solchen Atomen erfüllten Raume sich ein Erschütterungscentrum befindet, von dem beständig Erschütterungen nach aussen ausgehen, so werden von diesem die Atome fortgestossen werden. Diese Atome werden auf andere treffen, in schiefem Stosse abprallen, wieder andere in Bewegung setzen und so in einem kugelförmigen Raume die Bewegung ausbreiten, so dass die Materie vom Centrum nach aussen gedrängt wird und also die Dichte der Materie vom Centrum nach aussen bis auf unendliche Entfernungen hin abnimmt. Denkt man sich dann zwei Erschütterungscentra $A$ und $B$ im Raume, so wird auf der Verbindungslinie $AB$ derselben weniger Materie anzutreffen sein, als ausserhalb, und die Stösse der bewegten Atome werden auf die Erschütterungscentra wie eine Anziehungskraft in der Richtung $AB$ wirken. Da nun die Intensität der Stösse im Verhältniss der bewegten Masse und also die Verdünnung der Materie im umgekehrten Verhältniss des Quadrates der Entfernung abnehmen muss, so muss auch jene scheinbare Anziehungskraft nach diesem Gesetze wirken. Die Erschütterungscentra selbst kann man sich in zweierlei Weise denken. Entweder sie bestehen aus einer ursprünglichen Materie, die sich von der Aethermaterie dadurch unterscheidet, dass ihre Atome grössere Masse, grösseres Volumen und intensivere Bewegungen besitzen, oder (was theoretisch viel weiter trägt) sie sind nur einheitliche Vereinigungen von Aetheratomen. Zur Bildung dieser zusammengesetzten Einheiten hätte man auch keine andere Kraft als die Trägheit nöthig; durch wiederholte Stösse könnten vielmehr Mengen von Atomen so verändert werden, dass ihre translatorischen wie ihre rotatorischen Bewegungen von ganz gleicher Grösse und Richtung würden. Diese Vereinigungen von Atomen würden dann vermöge ihrer gleichen Bewegungen wie Ein-

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

---

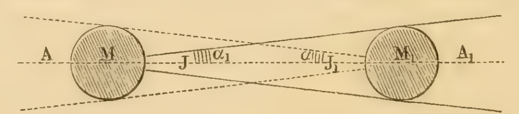
dass die Geschwindigkeit der Zurückwerfung nicht allein der Schwerpunktsgeschwindigkeit vor dem Stosse gleich werden kann, wie es bei den vollkommen elastischen Körpern vorkommt, sondern dass sie dieselbe noch übertrifft, ja sogar zu einer beliebigen Grösse anwächst, wenn nur der Körper eine hinlänglich grosse Rotationsgeschwindigkeit besitzt."

[1]) Wie Isenkrahe bemerkt (Räthsel der Schwerkraft, S. 108 bis 115) gilt aber auch nach Poinsot dieser Satz nicht allgemein, vielmehr geht auch beim Zusammenstoss rotirender unelastischer Körper die Energie der translatorischen Bewegung in einzelnen Fällen zum Theil oder auch ganz verloren, und wenn dies nicht der Fall ist, so wird doch immer die Gesammtenergie der äusseren Bewegung beim Zusammenstoss unelastischer Körper vermindert, indem ein grösserer Theil rotatorische Energie verbraucht wird, als zur Ausgleichung der verlorenen translatorischen Energie dient.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

heiten sich bewegen und gegen andere Atome sich verhalten.

Allgemeineres Interesse als diese Theorien, welche eine einheitliche Materie annehmen und auch die verschiedenen Atome noch aus dieser construiren wollten, haben indessen in neuester Zeit die Arbeiten erregt, welche, directer an die kinetische Theorie der Gase anschliessend, die Atome selbst als gegebene primitive Gebilde hinnehmen und sich nur bemühen, in der Weise von Lesage die zwischen den ponderablen Theilen wirkenden Kräfte durch Bewegungen ätherischer Atome zu erklären. Wir haben schon erwähnt, dass W. Thomson im Anfange der siebziger Jahre ganz auf Lesage zurückging, um dieselbe Zeit versuchte auch Heinr. Schramm[1]) die Theorie von Lesage genauer und mathematisch tiefer zu bearbeiten. Schramm denkt sich die schwermachende Materie ganz als ein Gas im Sinne der mechanischen Wärmetheorie. Die Atome dieses Weltgases sind vollkommen elastische Kugeln, von sehr kleiner aber verschiedener Grösse, die den Raum nur sehr undicht erfüllen und sich mit sehr grossen Geschwindigkeiten, wenn ungehindert gleichförmig und geradlinig, bewegen. Die Bewegungszustände an verschiedenen Orten des Raumes sind zwar im Allgemeinen verschieden, nähern sich aber, je grössere Zeiträume man in Betracht zieht, immer mehr einem constanten Mittelwerthe. Findet sich in diesen Atomströmen ein grösseres bewegtes Atom oder Molecül, so muss dieses durch die stärkere Wirkung der seiner Richtung entgegenstehenden Ströme nach und nach (wenn auch erst in unendlich langer Zeit) zur Ruhe gelangen. Stehen sich aber in solchen Atomströmen mehrere grössere Atome oder Molecüle gegenüber, so werden sie umgekehrt eine Bewegung zu einander hin erhalten. Denkt man sich nämlich zwischen den bewegten Atomen zunächst nur zwei grössere Molecüle $M$ und $M_1$ (s. die beistehende Figur), so werden dieselben von




allen Seiten des Raumes Atomstösse empfangen, mit Ausnahme von jenen Seiten $J$ und $J_1$, welche einander zugekehrt sind; denn die in der Richtung $AA_1$ und umgekehrt, innerhalb eines Winkelraumes vom Winkelradius $\alpha$ ziehenden Atome prallen an den Aussenflächen der Molecüle ab, werden in den übrigen Weltraum reflectirt und können somit die inneren Seiten nicht treffen. Dadurch kann der Oberflächentheil $J$ (und $J_1$) innerhalb des Winkelraumes $\alpha_1$ nur jene Atome empfangen,

[1]) Die allgemeine Bewegung der Materie als Grundursache der Erscheinungen, Wien 1872. Anziehungskraft als Wirkung der Bewegung, Graz 1873. — Heinr. Schramm, Director der Niederösterreichischen Landes-Oberrealschule in Wiener-Neustadt.

welche an der ihm zugekehrten Oberfläche $J_1$ (resp. $J$) reflectirt worden sind; nachdem aber jede Reflexion eines Atoms eine gewisse, wenn auch sehr kleine Zeit $\tau$ in Anspruch nimmt, während welcher das Atom seine Geschwindigkeit nach einer Richtung einbüssen, nach einer anderen Richtung wieder erlangen muss, so gelangen die reflectirten Atome, von welchen durchschnittlich in der Zeit $t$ je eines einen bestimmten Punkt der Oberfläche $J$ getroffen hätte, erst nach der Zeit $t + \tau$ zum Stoss. Während also die Aussenseite $A$ der Molecularoberfläche $m'$ Atome treffen, stossen gegen die Seite $J$ nur

$$m' \frac{t}{t + \tau}$$

Atome, was für die Aussenseite $A$ den Ueberschuss

$$m' \frac{\tau}{t + \tau} = m' k$$

giebt, dessen Stosskraft das Molecül $M$ dem Molecül $M_1$ zu nähern strebt. Die Beschleunigung, welche das Molecül $M$ dadurch nach dem Molecül $M_1$ hin erhält, ergiebt sich danach gleich

$$\frac{\varrho^2 \varrho_1^2 \pi m' k c}{M x^2},$$

wo $x$ die Entfernung der Molecüle, $\varrho$ und $\varrho_1$ ihre Radien und $c$ die Geschwindigkeit der Atome bedeuten. Die Beschleunigung ist also dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional, und da ein aus $n$ Molecülen $M_1$ gebildeter Körper auf andere auch eine $n$ fache Wirkung ausüben wird, so muss die Gesammtwirkung auch der Masse proportional sein, vorausgesetzt, dass die Molecüle des Körpers so weit von einander entfernt sind, dass ihre Wirkung thatsächlich als gleich angenommen werden kann. Bei der Ableitung der obigen Formel müssen aber dieselben Voraussetzungen gemacht werden, die Lesage schon seiner Theorie eingefügt, dass nämlich der Zustand des Aethers überall und zu aller Zeit derselbe, dass die schwermachenden Atome gegenüber den ponderablen Molecülen nur eine sehr geringe Masse besitzen und dass auch der Widerstand des Aethers gegen die Bewegung der Molecüle nur ein verschwindender ist; ausserdem verlangt die beobachtete Constanz der Gravitationsbeschleunigung auch noch die Constanz des Verhältnisses $\frac{\varrho^2}{M}$, verlangt also, dass die Masse des Molecüls nicht der dritten, sondern der zweiten seines Durchmessers proportional ist. Schramm versucht diese an sich nicht sehr wahrscheinliche Bedingung dadurch zu stützen, dass er anräth, die Molecüle als Hohlkugeln mit unendlich dünnen Wänden anzunehmen, eine Annahme, die auch die vollkommene Elasticität der Molecüle leichter als bei massiven Hohlkugeln begreifen lasse.

Isenkrahe aber wendet sich in seiner Schrift „das Räthsel

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

der Schwerkraft"[1]) gerade gegen die Annahme absolut elastischer Atome zum Zwecke der Erklärung der Gravitation; denn erstens dürfe dieselbe, weil sie nur wieder eine transcendente Eigenschaft der Atome bedeute, für mechanische Theorien der Materie an sich nicht zugegeben werden, und zweitens erweise sie sich gerade für den Zweck, dem sie dienen solle, als absolut unfruchtbar und nutzlos. Isenkrahe glaubt nämlich nachweisen zu können, dass bei absolut elastischen Atomen das Dasein eines ponderablen Molecüls in dem nach allen Seiten gleichen Wirbel der Aetheratome den Zustand des Aethers, d. h. die Geschwindigkeit seiner Atome und die Zahl der in einer bestimmten Zeit auf eine Fläche treffenden, in keiner Weise verändern könne, und schliesst daraus, dass auch die Gegenwart zweier solcher Molecüle vollständig ohne Einfluss bleiben muss[2]). Er giebt darum bei seiner Ableitung der Gravitation die Elasticität der Atome vollständig auf, behält aber im Uebrigen die Annahmen von Lesage und Schramm, die dualistische Auffassung der Materie, ihre atomistische Zusammensetzung und die primitiven Bewegungen in dem Aether unverändert bei. „Nehmen wir an, so sagt er, der Aether sei ein wesentlich homogenes Gas, seine Bestandtheile seien also alle einander gleich, so dürfen wir die Masse irgend eines Atoms mit der constanten Grösse $\mu$ bezeichnen. Wer diese Homogenität nicht annehmen will, kann sich unter der Grösse $\mu$ die durchschnittliche Masse der Aetheratome denken. Die durchschnittliche Geschwindigkeit wollen wir mit $c$ be-

---

[1]) Das Räthsel v. d. Schwerkraft. Kritik der bisherigen Lösungen des Gravitationsproblems und Versuch einer neuen, auf rein mechanischer Grundlage. Braunschweig 1879. — C. Isenkrahe, Oberlehrer in Bonn.

[2]) Diese Sätze scheinen in ihrer Begründung nicht ganz zu genügen. Erstens wird doch zu der Umwandlung der Bewegungen auch beim Stoss der elastischen Atome eine gewisse Zeit gefordert, die auf ein ponderables Molecül treffenden Aetheratome werden darum eine gewisse Zeit an demselben haften, und dadurch muss allerdings der Zustand des Aethers in der Nähe ponderabler Molecüle bis auf eine gewisse Entfernung hin verändert werden. Zweitens sind aber auch die Anhänger der Atomelasticität immer von dem Gleichgewicht eines Molecüls im Aetherwirbel ausgegangen und haben nur behauptet, dass zwei Molecüle sich gegenseitig als Schirme dienten und dass nur beim Dasein zweier Molecüle die Zahl der wirksamen Atome zwischen ihnen vermindert würde. Uebrigens muss man die Elasticität der Aetheratome von der der ponderablen Molecüle unterscheiden. Die Anhänger des elastischen Stosses setzen vor Allem die vollkommene Elasticität der Aetheratome voraus, damit durch die Zusammenstösse dieser Atome keine Kraft verloren gehe. Isenkrahe aber fordert die Gesetze des unelastischen Stosses vor Allem für das Zusammentreffen der Molecüle mit den Atomen, um die dabei stattfindende Kraftübertragung in seiner Weise zu erklären. Da aber über die Constitution der ponderablen Molecüle auch Isenkrahe keine ganz bestimmten Annahmen macht und da auch Schramm trotz des vollkommen elastischen Stosses eine Kraftübertragung annimmt, so gehen die Resultate der Theorien beider nicht so weit aus einander, als man nach ihren entgegengesetzten Annahmen glauben könnte.

Philosophie der Materie c. 1860 bis c. 1880.

zeichnen und die Dichtigkeit oder besser Häufigkeit, mit welcher die Aetheratome den Raum durchfliegen, wollen wir dadurch in die Rechnung einführen, dass wir die Zahl von Aetheratomen, welche in der Zeiteinheit durch eine im Raume beliebig fixirte Ebene von der Grösse 1 hindurchpassiren, $\nu$ nennen. So lange nicht besondere Gründe dagegen sprechen, nehmen wir an, dass die Aetheratome sich nach keiner Richtung des Raumes im Allgemeinen zahlreicher und schneller bewegen, als nach irgend einer anderen. Die Frage, ob die letzten Bestandtheile der unseren Sinnen auffälligen Körper, der sogenannten „groben Materie“, mit den Aetheratomen identisch sind oder nicht, werfen wir hier nicht auf. Wir nehmen nur an, dass sie sich in irgend einer Weise, sei es essentiell oder bloss formell, vom Aether unterscheiden. Wo wir die Einwirkung des Aethers auf die Bestandtheile der Körper in Rechnung ziehen, nennen wir letztere „Molecüle“, bezeichnen ihre Masse mit $m$ und ihre Geschwindigkeit mit $v$. So oft die Gestalt der Atome oder Molecüle in Frage kommt, haben wir unsere Betrachtung auf die Kugelform eingeschränkt, weil alle anderen Formen der Rechnung grosse Schwierigkeiten bieten, deren Ueberwindung einstweilen ausserhalb des Interesses unserer Arbeit liegt.“ Nach diesen Voraussetzungen beschäftigt sich Isenkrahe mit der Wirkung der Aetherströme (in denen er vor der Hand nur translatorische Bewegungen annimmt) auf ein ruhendes Molecül. Auf die Flächeneinheit treffen in der Secunde $\frac{\nu}{2}$ Atome auf, also $\frac{\nu}{2}\,dt\,df$ Atome in der Zeit $dt$ auf das Flächenelement $df$. Der Stosseffect auf das Flächenelement (eines kugelförmigen Molecüls) ist aber für die verschiedenen Atome je nach ihrer Richtung verschieden. Für den centralen Stosseffect aller auftreffenden Atome ergeben mathematische Entwickelungen $\frac{1}{3}\mu\,\nu\,c\,df\,dt$ [1]). Die tangentialen Stosseffecte müssen sich paarweise schon an jedem Flächenelement aufheben; für das ganze kugelförmige Molecül aber muss auch die Summe aller centralen Stosseffecte Null werden, und das Molecül muss, wie es in Ruhe war, auch in Ruhe verbleiben [2]). Nächst dem Einfluss der Aetheratome auf das ruhende

---

[1]) Würden alle Atome senkrecht auf das Flächenelement treffen, so würde der gesammte Stosseffect $\frac{1}{2}\mu\,\nu\,c\,df\,dt$ betragen, das Verhältniss der Wirkungen ist also 2 : 3. Schramm hatte durch ein Versehen, wie Isenkrahe andeutet, für dieses Verhältniss den Werth 1 : 2 gegeben.

[2]) Isenkrahe fügt hier einen sehr wichtigen, weittragenden Excurs ein. Die Aufhebung aller centralen Stosseffecte kann in aller Strenge nur eintreten, wenn alle Stösse gleichzeitig erfolgen. Da das aber nur eine seltene Ausnahme sein kann, so wird in Wirklichkeit das Molecül eine Ziekzacklinie beschreiben und um eine gewisse Mittellage in allen möglichen Ebenen oscilliren. „Als Wirkungen der Aetherstösse bei einem einzelnen Molecül sind aber nicht bloss

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Molecül ist aber auch der Einfluss des letzteren auf die ersteren in Betracht zu ziehen. Da die Aetheratome unelastisch sind und auf unelastische Körper stossen [1]), so müssen sie dabei eine Verminderung ihrer Geschwindigkeit erleiden, die von der Masse des Molecüls abhängt, und zwar wird diese mit der letzteren Masse bis zu $^1/_3$ der Atomgeschwindigkeit anwachsen können [2]). In der Nähe eines Molecüls wird also die Geschwindigkeit der Atome eine kleinere und damit der gesammte Stosseffect oder der Aetherdruck ein geringerer als im freien Aether sein. Diese Verminderung des Aetherdrucks in der Nähe eines Molecüls erzeugt die scheinbare Attraction oder die Gravitation nach demselben hin, und es ist leicht zu zeigen, dass diese Verminderung des Druckes oder diese scheinbare Gravitation im umgekehrt quadratischen Verhältniss zu der Entfernung von dem Molecüle

---

diese (Wärme?) Oscillationen, sondern auch innere Bewegungen, Verschiebungen der einzelnen Theile desselben in Betracht zu ziehen. Wir haben nämlich von vornherein die Molecüle, d. h. die nächsten Bestandtheile der sinnfälligen Materie — wie die Chemie das ja überhaupt thut — als Conglomerate aufgefasst, müssen also die Form derselben als eine veränderliche ansehen. Betrachten wir nun, um die Vorstellung etwas zu vereinfachen, bloss einen Querschnitt des Molecüls, so sehen wir eine Gruppe von Molecülatomen vor uns, welche von allen Seiten durch die aufprallenden Aetheratome getroffen und zurückgestossen werden . . . Für ein gewisses Zeitintervall müssen wir behaupten, dass der durch die allseitigen Impulse ausgeübte Druck ein für alle Punkte der Peripherie gleich grosser ist, dass also die Form der letzteren ein Kreis sein muss. Betrachten wir aber kleinere Zeitintervalle, so ist die Sache sehr anders. Jedes einzelne aufprallende Aetheratom zerstört die Kreisform des Querschnittes, indem es einen einseitigen Druck ausübt, und je nach der Geschwindigkeit, die es hatte, wird die entstandene Deformation grösser oder kleiner sein. Aber alle diese Aenderungen haben keinen Bestand, sie treten in rascher Aufeinanderfolge bald hier, bald dort ein, und man kann in gewissem Sinne behaupten, dass die Peripherie des Querschnitts um die Kreisform oscillire. Auch in dem Falle, wo etwa zwei Molecüle in einem schiefen Stosse aufeinanderprallten, würden sie wohl beide eine Deformation erleiden, aber auch diese könnte nicht von Dauer sein, denn die mit grosser Schnelligkeit einstürmenden Aetheratome würden bald den oscillirenden Kreis wieder hergestellt haben. Vielleicht geschieht das schon während des Contactes beider Molecüle in einer solchen Weise, dass die Energie des Abprallens beider von einander dadurch wesentlich beeinflusst wird. In einem solchen Verhalten dürfen wir eine Art von Elasticität erblicken, die nur als Phänomen, nicht als Kraft im gewöhnlichen Sinne dieses Wortes aufzufassen ist, und die demnach wohl dazu dienen könnte, eine Menge von Wirkungen zu motiviren, die bisher durch die unbegriffene Kraft der Elasticität motivirt worden sind. Es scheint mir nicht unmöglich, auf solche Art die Elasticität der Molecüle (wenigstens bis zu einem gewissen Grade) als eine Folge des allseitigen Aetherdrucks sich zu denken."

[1]) Wenn auch das Molecül scheinbar elastisch ist, so sind doch seine Theile, welche die Stösse auffangen, jedenfalls unelastisch.

[2]) Die Durchschnittsgeschwindigkeit, mit der die Atome von einem Molecül zurückprallen, beträgt

$$\frac{2}{3} c \cdot \frac{3\mu^2 + 3\mu m + m^2}{2\mu^2 + 3\mu m + m^2}.$$

steht. Zwar könnte man einwenden, dass durch die Verzögerung der Aetheratome der Aether in der Umgegend des Molecüls verdichtet und dadurch die scheinbare Attraction aufgehoben werden müsste; dagegen aber liesse sich leicht zeigen, dass doch durch einen bestimmten Querschnitt des Raumes nach der Verdichtung nicht mehr Molecüle als vorher gehen können und dass danach der Stosseffect oder der Aetherdruck trotz der unleugbaren Verdichtung, wie vorher angegeben, verringert werden muss.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Da wir die Molecüle kugelförmig gedacht haben und da die Aetherbewegungen nach allen Richtungen als gleich angenommen worden sind, so muss auch der Aetherdruck um ein ponderables Molecül ganz gleich vertheilt sein, und ein in dem bewegten Aether allein vorhandenes Molecül muss also trotz der Bewegung auch in Ruhe bleiben [1]). Steht aber dem Molecül $a$ ein anderes $b$ gegenüber, so haben die von $b$ herkommenden Molecüle eine geringere Geschwindigkeit als alle die übrigen, welche auf $a$ eindringen, und der dadurch entstehende Ausfall wirkt als eine Kraft, welche die beiden Molecüle zu nähern strebt. Isenkrahe leitet für diese so entstehende Pseudoanziehungskraft, welche $b$ auf $a$ ausübt, den Ausdruck

$$\frac{\varrho^2 r^2}{E^2} \cdot \frac{\pi v}{3} \, dt f(\varrho),$$

für die Anziehungskraft von $a$ auf $b$ den Werth

$$\frac{\varrho^2 r^2}{E^2} \cdot \frac{\pi v}{3} \, dt f(r),$$

und für die Gesammtwirkung zwischen beiden also den Ausdruck

$$\frac{\varrho^2 r^2}{E^2} \cdot \frac{\pi v}{3} \left[ f(\varrho) + f(r) \right]$$

ab, wo $E$ die Entfernung, $r$ und $\varrho$ die Radien der Molecüle und $f(r)$ und $f(\varrho)$ die Geschwindigkeitsverluste [2]) bedeuten, welche die Aetheratome bei der Reflexion an den betreffenden Molecülen $a$ und $b$ erleiden. Dieser Ausdruck bleibt in seiner Anwendung auf die Fälle begrenzt, wo die Entfernung der Schwerpunkte der Molecüle so unverhältnissmässig gross gegen die Radien derselben ist, dass man überall die Entfernung der Oberflächen mit dieser Entfernung vertauschen kann. Wo das wegen der Kleinheit der Abstände nicht möglich ist, da ist jener Nennerfactor $E$

[1]) Nur wenn die Molecüle nicht regelmässig kugelförmig angenommen werden, kann es kommen, dass der Aether in der Nähe des Molecüls je nach der Form desselben ungleich verdichtet wird. Aus diesen ungleichen Verdichtungen nach verschiedenen Richtungen hin liessen sich vielleicht manche Probleme der Molecularphysik erklären, die man bis jetzt nur durch besondere Molecularkräfte zu erklären versucht hat.

[2]) Diese Geschwindigkeitsverluste hängen von den Massen der Molecüle, mithin auch von deren Radien $r$ und $\varrho$ ab und sind also Functionen dieser Radien.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

zu gross. Die Kraftwirkung in molecularen Abständen ist somit grösser, als in endlichen Entfernungen, woraus man ableiten könnte, dass auch die Molecularkräfte Adhäsion, Cohäsion und Affinität stärker als die Gravitation wirken müssten [1]). Um nun von der Anziehung der Molecüle zur Anziehung der Körper und damit zur Erörterung des Begriffs Masse zu kommen, denkt sich Isenkrahe zwei Platten, jede nur aus einer Schicht von Molecülen gebildet, so einander gegenüberstehen, dass sie auf ihrer Verbindungslinie senkrecht sind. Diese Molecüle stören sich dann gegenseitig in ihren Wirkungen nicht, und die Gesammtwirkung kann leicht durch die Summirung der bekannten Einzelwirkungen erhalten werden. Aus der Bildungsart dieser Summe folgt aber, dass man die Wirkung einer Schicht auf eine zweite gegenüberstehende ebenso wohl dadurch verdoppeln kann, dass man eine andere der ersten ganz gleiche Schicht neben dieselbe setzt, als auch dadurch, dass man zwischen die Molecüle der ersten Schicht noch eine ganz gleiche Abtheilung von Molecülen einschiebt. Daraus folgt, dass die Wirkungen zweier Molecularschichten auf einander im zusammengesetzten Verhältnisse ihrer Volumina und ihrer Dichten stehen oder dass sie den Massen proportional sind, wenn man für das Product aus Dichtigkeit und Volumen den etwas zweifelhaften Begriff der Masse setzen will [2]).

Danach bleibt Isenkrahe nur noch die letzte, aber auch schwerste Aufgabe, die Ableitung der Anziehung eines aus mehreren hinter einander stehenden Schichten zusammengesetzten Molecülsystems, oder eines physischen Körpers übrig. Zu dem Zwecke denkt er sich hinter die eine Molecularschicht $A_1$ parallel mit ihr eine zweite gleiche $A_2$ geschoben, in solcher Entfernung $A_1 A_2$, dass dieselbe gegen die Entfernung $A_1 B$ der ersten Schicht von der gegenüber stehenden Schicht $B$ vernachlässigt werden darf. Dann könnte man in erster Annäherung die Wirkung jeder der beiden Schichten $A_1$ und $A_2$ auf $B$ als gleich und ihre Gesammtwirkung doppelt so gross als die Wirkung der ersteren allein setzen. Aber das würde auch nur eine sehr grobe Annäherung sein. Da an der ersten $A$-Schicht eine Anzahl von Aetheratomen, nehmen wir an $\Delta v$, abgeprallt sind, so gehen nach der zweiten $A$-Schicht nur noch $v - \Delta v$ Atome, von denen nach dem Ver-

---

[1]) Auf diesen Umstand hat auch Schramm schon aufmerksam gemacht.

[2]) Merkwürdigerweise muss Isenkrahe, ganz ähnlich wie Schramm, die Constanz des Quotienten $\frac{r^2 f(r)}{M}$ voraussetzen, wenn seine Entwickelungen eine constante Gravitationsbeschleunigung ergeben sollen. Isenkrahe nimmt aber zu dem Zwecke nicht wie Schramm die Proportionalität von Masse und Oberfläche, sondern direct die gleiche Grösse aller letzten Bestandtheile der Materie an. Er weist darauf hin, dass vielleicht auch die ponderable Materie in letzter Theilung aus Aetheratomen besteht, und führt für diese Meinung den Glauben vieler bedeutenden Chemiker an eine Urmaterie an.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

hältniss der ersten Zurückwerfung nur $\Delta v\left(1-\frac{\Delta v}{v}\right)$ abprallen können. Da nun die gravitirenden Wirkungen der Schichten unter sonst gleichen Umständen nur von der Zahl der abprallenden Atome abhängen, so müssen die Wirkungen von $A$ und $A_1$ den Ausdrücken 1 und $1-\frac{\Delta v}{v}$ proportional sein, wonach sich dann leicht für die Wirkungen einer grösseren Anzahl hinter einander stehender Schichten die Verhältnisse

$$1:\left(1-\frac{\Delta v}{v}\right):\left(1-\frac{\Delta v}{v}\right)^2:\left(1-\frac{\Delta v}{v}\right)^3:\cdots\cdots$$

ergeben. Damit wäre der kaum annehmbare Satz ausgesprochen, dass die verschiedenen Schichten eines Körpers nicht mehr gleich gravitirend wirkten und dass also die Gravitation eines Körpers nicht seiner Masse proportional sein könnte. Gegen denselben liesse sich zwar aus mancherlei physikalischen Gründen noch einwenden, dass die Abstände der Körpermolecüle im Verhältniss zu ihren Dimensionen ungeheuer gross seien, wonach der Quotient $\frac{\Delta v}{v}$, welcher jene Abnahme der Gravitation bedingt, ungeheuer klein werden müsste, immerhin aber muss dieser Quotient einen gewissen Werth behalten, weil sonst die Gravitation überhaupt aufgehoben würde. Isenkrahe versucht darum durch eine zweite Annäherung die gefundene Abnahme der Gravitation mit der Dicke des Körpers noch stärker zu verkleinern. Dazu betont er, dass die Atome, welche an der ersten $A$-Schicht abprallen oder besser abgleiten[1]), für die übrigen $A$-Schichten nicht ganz verloren gehen, sondern auch noch auf diese Schichten, nur mit verminderter Geschwindigkeit, auftreffen. Bezeichnet man den Geschwindigkeitsverlust, den die Atome beim Abprallen an der ersten Schicht erleiden, mit $\Delta c$, so erhält man durch einfache mathematische Entwickelungen für die gravitirenden Wirkungen der hinter einander stehenden $A$-Schichten (ähnlich wie vorhin) die Verhältnisse:

$$1:\left(1-\frac{\Delta v}{v}\cdot\frac{\Delta c}{c}\right):\left(1-\frac{\Delta v}{v}\cdot\frac{\Delta c}{c}\right)^2:\left(1-\frac{\Delta v}{v}\cdot\frac{\Delta c}{c}\right)^3:\cdots\cdots$$

Da nun wieder $\Delta c$ als sehr klein gegen $c$ angenommen werden kann, so wird durch diese dritte Annäherung die Verminderung der Gravitation noch mehr verringert, und da ein Atom nicht bloss vorschreitend, sondern bei vielen Schichten schliesslich auch wohl rückwärts reflectirt wird, so kann durch solche überschüssige Reflexionen seine Geschwindigkeit noch mehr ausgenutzt und damit die Abnahme der gravitirenden Wirkung der Schichten auf eine ganz unmerkbare Grösse herabgebracht werden. Trotzdem aber bleibt doch die Verminderung in

[1]) Der Reflexionswinkel ist nämlich ein sehr stumpfer, er liegt zwischen 132 und 161°.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880

der Theorie und damit der Widerspruch gegen die bisherige Annahme einer absoluten Proportionalität der Masse und der Schwerkraft bestehen. Direct kann auch zwischen den entgegenstehenden Annahmen nicht entschieden werden, da man die Masse bis jetzt eben nur durch die Gravitation zu messen vermag. Für einen indirecten Entscheid macht Isenkrahe darauf aufmerksam, dass nach seiner Theorie die Schwere von dem Abstande der Molecüle und damit von der Temperatur abhängen muss, was nach der alten Anschauung von der Schwere als einer primitiven Kraft nicht der Fall sein kann. Da aber die Schwere durch die Temperatur auch nach der neuen Theorie doch nur sehr wenig geändert werden kann, so ist auch auf diese Weise eine Entscheidung für lange Zeit noch nicht zu hoffen [1].

Indessen existiren noch andere Differenzen zwischen der Wirkungsart der Schwere, wie sie nach der neuen oder den alten Theorien beschaffen sein müsste, und es wäre nicht unmöglich, dass durch diese in kürzerer Zeit eine Entscheidung zu erreichen wäre. Nach der Newton'schen Anschauung (wie auch nach den Galilei'schen Fallgesetzen) ist die Gravitation von dem Bewegungszustande der ponderablen Massen gänzlich unabhängig, nach den kinetischen Theorien derselben aber muss sie mit der Geschwindigkeit der gravitirenden Körper so abnehmen, dass sie den Werth Null erreicht, wenn die Geschwindigkeiten der schweren Massen und der Aetheratome gleich werden. Schramm hat auch schon in den erwähnten Abhandlungen die Geschwindigkeit der Aetheratome auf ganz plausible Art bestimmt und so das Mittel gegeben, um die Verminderung der Gravitation durch die Bewegung der ponderablen Massen zu berechnen. Er fand nämlich, dass nach den Voraussetzungen der kinetischen Gastheorie die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellenbewegungen in den Gasen zu der translatorischen Geschwindigkeit ihrer Molecüle sich wie 2 : 3 verhalten muss. Damit stimmend erhält man aus der beobachteten Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls in der Luft von 332 m eine translatorische Geschwindigkeit der Luftmolecüle von 498 m, eine Zahl, die von der von Clausius berechneten 485 m wirklich nicht viel abweicht. Wendet man dasselbe Verfahren auf den gasförmig gedachten Aether an, so berechnet sich aus einer Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes von 42 000 Meilen eine translatorische Geschwindigkeit der Aetheratome von 63 000 Meilen in der Secunde. Dies würde denn auch die Geschwindigkeit sein, welche ponderable Massen erlangen müssten, damit die schwermachende Wirkung der Aetherströme auf sie verschwände. Die nahe Uebereinstimmung dieser Zahl aber mit der Weber'schen Constanten $c = 59\,320$, d. i. der Geschwindigkeit, bei welcher

[1] Die Frage nach einem Zusammenhange der Schwere und der Temperatur ist schon mehrfach, zuletzt auch wieder von Secchi in seinem Werke „Die Einheit der Naturkräfte", untersucht worden.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

die Wirkung zweier bewegten Elektricitätstheilchen auf einander nach dem Weber'schen Gesetze zu Null werden muss, giebt einen starken Grund dafür ab, die Gravitation mit der elektrischen Anziehung zu identificiren oder vielmehr sie beide aus derselben Quelle, den Stössen bewegter Aetheratome, abzuleiten. Nach dem Weber'schen Gesetze würde dann auch die Gravitation aus der Formel

$$\frac{m \cdot m_1}{r^2}\left[1 - \frac{1}{c^2}\left(v^2 - 2r\frac{dv}{dt}\right)\right]$$

zu berechnen sein, die hierbei zu findenden Verminderungen der Gravitation durch die Geschwindigkeit der schweren Massen würden aber bei der Grösse der Constanten $c$ und der Kleinheit aller stattfindenden Geschwindigkeiten ponderabler Körper ganz ausserhalb der Beobachtungsgrenzen fallen. Dafür ergiebt sich aus den Betrachtungen noch eine andere Hoffnung, zwischen den beiden entgegenstehenden Theorien experimentell entscheiden zu können. Die Gravitation als eine unvermittelte Wirkung in die Ferne muss sich momentan durch alle Räume ausbreiten, als eine Wirkung von Aetherstössen aber kann sie höchstens mit der Geschwindigkeit der Aethermolecüle von einem Punkte des Raumes bis zu einem anderen sich fortpflanzen. Bei der Grösse der zu Gebote stehenden kosmischen Beobachtungsräume muss diese Fortpflanzungszeit der Gravitation auch gerade so wie die des Lichtes von leicht zu beobachtender Grösse werden, leider lassen sich bei der ersteren nicht wie bei dem letzteren Unterbrechungen, sondern nur minimale Veränderungen der Intensität in ihrer Fortpflanzungszeit beobachten. Solche Veränderungen der Schwere werden auf der Erde durch die wechselnden Stellungen der Sonne und des Mondes bewirkt. Das Gewicht eines Körpers (mit der Federwage gewogen) muss nach der Newton'schen Anschauung gerade im Mittag ein Minimum und gerade um Mitternacht ein Maximum zeigen, nach der kinetischen Anschauung müssen diese Erscheinungen etwas verspätet eintreten. Auch die wechselnde Stellung des Mondes muss bei sehr empfindlichen Pendeln und Libellen ähnliche periodische Veränderungen herbeiführen. Doch ist es bis jetzt nicht gelungen, weder eine Veränderung der Intensität der Schwere überhaupt zu messen, noch nachzuweisen, ob diese Veränderungen direct mit ihren kosmischen Ursachen oder etwas verspätet eintreten. Zöllner dachte in der That daran, mit Hülfe eines Horizontalpendels jene Frage nach der Fortpflanzungszeit der Gravitation zu entscheiden. Ein solches von ihm construirtes Horizontalpendel [1]) bestand aus einem an

---

[1]) Pogg. Ann. CL, S. 131 und 134, 1873. Zöllner bemerkte erst während des Druckes seiner Abhandlung, dass Perrot das Horizontalpendel ganz in seiner Art schon 1862 (Compt. rend. LIV, p. 728; Pogg. Ann. CXVI, S. 511) beschrieben. Nach dem Erscheinen der Abhandlung aber wurde man darauf

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

einem Faden so aufgehängten Stabe, dass der eine Aufhängepunkt sehr nahe an das Ende des Stabes fiel. Der längere Arm trug ein ziemlich schweres Gewicht, der kürzere wurde zur Herstellung des Gleichgewichtes durch einen nach unten gehenden und unten befestigten Faden gehalten. Durch Annäherung der Angriffspunkte der beiden Faden konnte das Directionsmoment des Stabes beliebig verkleinert und dadurch die Empfindlichkeit des Pendels beliebig erhöht werden; freilich wurden dadurch auch alle möglichen Störungen, die das Pendel durch Bewegungen seiner Umgebung erfuhr, um so grösser. Ueber die Constatirung einer etwaigen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schwere sagt Zöllner am Schlusse der citirten Abhandlungen: „Unter Voraussetzung der eben erwähnten Aufstellung im Meridian müsste das Pendel, wenn es sich nur unter dem Einfluss der Sonne bewegte, im Laufe von 24 Stunden vier Mal seine Gleichgewichtslage im Meridian passiren, nämlich beim Auf- und Untergange und bei ihrer oberen und unteren Passage durch den Meridian. Da diese Bewegungen des Pendels keine Summationswirkungen, wie diejenigen des Meeres bei der Ebbe und Fluth sind, sondern direct durch attractive Fernwirkungen erzeugt werden, so müssen sie auch gleichzeitig mit der entsprechenden wahren Position der Sonne stattfinden. Braucht dagegen die Schwerkraft, wie das Licht, etwa acht Minuten Zeit, um von der Sonne zur Erde zu gelangen, so würden die

---

aufmerksam, dass Lorenz Hengler sogar schon im Jahre 1832 (Dingl. Journ. XLIII, S. 81) ein solches Horizontalpendel construirt und über dessen Anwendung gesagt hatte: „Ich stellte nun im Neumonde des Monats März die Wage so, dass der Hebelarm Mittags 12 Uhr in der Mittagslinie ruhte, und nun machte er folgende Oscillationen: Von 12 Uhr an zog er sich immer mehr nach Westen, bis etwa nach 3 Uhr, kehrte dann wieder allmälig zurück, so dass er etwas nach 6 Uhr wieder in der Mittagslinie stand; zog sich dann nach und nach hinüber nach Osten u. s. w. Wenn ich die Grenzen dieser Oscillationen an verschiedenen Tagen verglich, so zeigte es sich, dass sie am grössten waren zur Zeit des Neu- oder Vollmondes; am kleinsten aber in den Quadraturen.“ Ueber den ganz verschollenen Hengler theilte Prof. Zech (Pogg. Ann. CL, S. 496) mit, dass er am 3. Februar 1806 in Reichenhofen geboren und sich mit Unterstützung von Wohlthätern zuerst auf theologische Studien vorbereitet, dann aber 1830 in München Mathematik und Astronomie studirt habe. Nach zweijährigem Studium sei er aus Mangel an Mitteln nach Stuttgart zurückgegangen, um bei einem Optiker das Glasschleifen zu erlernen, habe aber danach die theologische Carrière wieder aufgenommen und sei danach an verschiedenen Orten Pfarrer gewesen. Zu Münzigen sei er 1858 als Pfarrer an einem Kehlkopfleiden gestorben, noch zuletzt mit der Construction eines grossartigen Fernrohrs beschäftigt. Ueber die Benutzung einer Federwage zur Bestimmung der Variationen der Schwere sagt Perrot in der oben angegebenen Abhandlung: „Wenn man an einer sehr langen, schraubenförmigen Feder eine Schale aufhängt und ein Gewicht in dieselbe legt, so entstehen zugleich zwei Effecte, Senkung und Drehung der Schale. Vernachlässigt man die Senkung, so glaube ich, aus meinen Versuchen schliessen zu können, dass man mittelst einer Feder von einigen Metern Länge und sehr geringem Durchmesser eine Veränderung von 0,01 mm der Schwerkraft, d. h. eine Wirkung 10 mal geringer als das Maximum der des Mondes, wird nachweisen können.“

obigen Gleichgewichtslagen des Pendels auch um diese Zeit verspätet stattfinden müssen. Gelingt es daher, die Zeiten seiner Gleichgewichtslagen auch nur bis auf eine Minute genau zu bestimmen, so würde die Frage, ob die Schwerkraft zur Fortpflanzung Zeit gebrauche, noch bei einer Fortpflanzungsgeschwindigkeit entschieden werden können, welche acht Mal grösser als diejenige des Lichtes ist." So viel wir wissen, ist aber bis jetzt noch kein Versuch gemacht worden, diese entscheidenden Experimente auszuführen. Isenkrahe schliesst seine Untersuchung des Räthsels der Gravitation mit den Sätzen: „Nur das Zöllner'sche Experiment ist meiner Meinung nach ein wirklich kritisches. Wenn die Gravitation in der That durchaus keine merkbare Zeit gebraucht, um ihre Wirkung von der Sonne aus auf die Erde zu übertragen, so würde für einen Vertheidiger der Aetherstosstheorie nichts anderes übrig bleiben, als etwa noch zu sagen: Die Geschwindigkeit der Aetheratome ist so gross, dass der Radius der Erdbahn eine verschwindend kleine Strecke dagegen ist — eine Behauptung, zu der die Mehrzahl der Physiker wohl zweifelnd den Kopf schütteln würde. Aber ich halte es für wahrscheinlich, dass der Gravitation ein ähnliches Schicksal beschieden ist, wie dem Lichte. . . . Die Verbreitung der Gravitation ist 200 Jahre länger als die des Lichtes für eine momentane gehalten worden; sollte sich nicht auch für sie ein Olaf Römer finden, der ihr die Meilenzahl pro Secunde ausrechnete? So lange bis das geschehen, wird unsere Theorie allerdings nur als Hypothese auftreten und mit anderen ihresgleichen den Kampf ums Dasein führen müssen."

Isenkrahe's Beitrag zur Lösung des Räthsel von der Schwerkraft ist eine bedeutende wissenschaftliche Leistung, die einen Hauptwerth in der umsichtigen und objectiven Behandlungsweise ihres Themas hat. Während die meisten Gegner der Gravitation als Urkraft bis dahin ihre Kräfte in Einzelarbeiten zersplitterten und wie Agitatoren und Propheten mehr zu überreden versuchten als zu beweisen vermochten, ging Isenkrahe in langsamerer, mehr gewohnter Weise vor, studirte, prüfte und verglich die Arbeiten seiner Vorgänger, behielt von ihnen, was von genügender Sicherheit schien, und war überall bemüht, das Hypothetische streng als solches zu bezeichnen. Dadurch erreichte er einerseits, dass seine Arbeit mehr von der Allgemeinheit der Physiker beachtet und geachtet wurde, als das bei manchen früheren Arbeiten der Art der Fall gewesen, und anderentheils wurde auch durch seine Untersuchungen für folgende Arbeiten ein besserer Grund gewonnen und weiteren tollen und haltlosen Hypothesen der Boden so viel als möglich entzogen. Im Uebrigen verkannte Isenkrahe selbst nicht, dass auch seine Behandlung noch nicht alle Schwierigkeiten des Räthsels beseitige, und leider darf man nicht verkennen, dass gerade diese bleibenden Schwierigkeiten für die Lösung von fundamentaler Bedeutung sind.

Sehen wir von den eigentlichen Aetherdrucktheorien ab, so bleiben zweierlei Arten kinetischer Theorien der Gravitation, die Undulations-

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

und die Percussionstheorien übrig, und es lässt sich nicht leugnen, dass beide die Schwere als die Wirkung von Bewegungen abzuleiten vermögen. Die Undulationstheorien haben dabei den grossen Vortheil, dass ihnen in dem Licht- und Wärmeäther das undulirende Medium schon gesichert ist und dass scheinbare, durch Wellenbewegungen elastischer Medien hervorgerufene Anziehungen und Abstossungen bereits experimentell nachgewiesen sind. Diese Vortheile werden aufgewogen durch die Schwierigkeit, die Entstehung und Erhaltung der schwermachenden Schwingungen ohne primitive Anziehungs- und Abstossungskräfte zu erklären, wie durch die Schwierigkeit, die Uebertragung der Schwingungen vom Aether auf die ponderable Materie und die Umwandlung der Schwingungen in translatorische Bewegungen irgendwie mathematisch zu fassen. Die Percussionstheorien dagegen können sich nur auf die kinetische Theorie der Gase durch die Annahme stützen, dass auch der Aether seiner molecularen Constitution nach als ein Gas anzusehen sei. Dafür aber ist hier die Erhaltung der bewegenden Kräfte eine scheinbar selbstverständliche und die Umwandlung der Bewegungen ist durch die Gesetze des elastischen oder unelastischen Stosses auch mathematisch vollkommen bestimmt. Einfachheit der Postulate, Anschaulichkeit der Entwickelungen und leichtere Verification der Resultate sind den Percussionstheorien jedenfalls mehr als den Undulationstheorien eigen, und die allgemeine Meinung der Physiker neigt neuerer Zeit auch mehr den ersteren als den letzteren zu. Die Hindernisse, welche der allgemeinen Annahme der Percussionstheorie der Gravitation noch gegenüber stehen, liegen auch viel weniger in ihrer Erklärung der Kraftwirkung, als vielmehr in der ihr zu Grunde liegenden atomistischen und dualistischen Auffassung der Materie. Isenkrahe hält elastisch und zusammengesetzt aus Theilen für untrennbare Begriffe und nimmt danach die letzten einfachen Theile der Materie, die Atome, als absolut unelastisch an. Da nun bei den einfachen Atomen eine Umwandlung von äusserer Bewegung in innere nicht möglich ist, so muss der bei dem unelastischen Stoss der Atome eintretende Verlust an Kraft ein absoluter sein, und das Gesetz von der Erhaltung der Kraft muss wenigstens für die Welt der Atome (für die Molecüle nimmt auch Isenkrahe eine abgeleitete Elasticität an) ungültig sein [1]. In der That beschränkt Isenkrahe

---

[1] Das Räthsel von der Schwerkraft, S. 130: „Der Satz von der Erhaltung der Kraft ist nun in der That eine so imponirende Errungenschaft der Naturlehre unseres Jahrhunderts, dass es wohl begreiflich ist, wie man aus Ehrfurcht davor sich zu allerhand Kunststücken verführen lassen kann, um die vollkommene Starrheit und Unveränderlichkeit der Aetheratome mit diesem Princip in Einklang zu setzen. Einerseits der logische Zwang, den Atomen verschiebbare Theile abzusprechen, andererseits das Gesetz von der Erhaltung der lebendigen Kraft: wer beiden in vollem Maasse gerecht werden und doch auf der

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

seiner Theorie zu Liebe das Gesetz von der Erhaltung der Kraft auf die sicht- und tastbare Materie und erklärt dasselbe den sinnlich nicht wahrnehmbaren Massen, den Atomen gegenüber für nicht erwiesen und vielleicht ungültig. Da aber die Atome des Aethers mit den ponderablen Molecülen in immerwährender Wechselwirkung stehen, so muss ein Verlust an Kraft in den Atomen auch ein solcher für die Molecüle werden und Isenkrahe kann das Gesetz von der Erhaltung der Kraft auch für die sinnlich wahrnehmbare Materie nur für ein näherungsweise gültiges halten, indem er die schliesslichen Verluste an Kraft gegenüber dem unendlich grossen Vorrath von Energie als verschwindend klein darstellt [1]. Damit aber ist das Gesetz von der Erhaltung der Kraft in seinem principiellen Charakter vernichtet und Isenkrahe ist mit seiner Theorie in einen Gegensatz zu diesem Gesetz getreten, wie er sich mit der Annahme unelastischer Atome schon im Widerspruche mit der kinetischen Theorie der Gase, auf deren Boden die Aetherstosstheorien der Gravitation erst neu erblühten, befand. Diese beiden Umstände bilden eine schwere Instanz gegen die Isenkrahe'sche Theorie und lassen erwägen, ob nicht die Elasticität der Atome doch zu begründen und die Uebertragung der Kräfte von den Atomen auf die Molecüle mehr nach den Angaben von Lesage und Schramm zu denken sei.

In der That haben viele Physiker das Gesetz von der Erhaltung der Kraft auch für die Atome dadurch zu retten versucht, dass sie den Atomen trotz ihrer Einfachheit doch elastische Eigenschaften zuschrieben. Von dieser Seite machte man darauf aufmerksam, dass allerdings, wenn die Uebertragung der Bewegungen durch die kleinsten Theile der Massen vermittelt werde, die Bewegung ganz oder theilweise auf diese Theile übergehen und somit der Stoss ein ganz oder theilweise unelastischer werden könne, dass aber bei dem Zusammenstoss einfacher Körper eine Transformation der Bewegung in innere gar nicht möglich sei und der Stoss also immer ohne Verlust lebendiger Kraft und somit elastisch erfolgen müsse. Da aber hiernach die Atome ohne jede Möglichkeit

---

Huyghens'schen Fundamentalhypothese bauen will, der befindet sich allerdings einer Aufgabe gegenüber, deren Lösung meiner Meinung nach unmöglich ist."

[1] Das Räthsel von der Schwerkraft, S. 152: „Vergegenwärtigt man sich nun die berechneten enormen Strecken, welche die Körper unseres Sonnensystems zwischen sich lassen und erst jene unvorstellbar grossen Räume, welche die Fixsterne bis zu den fernsten Nebelflecken von einander trennen, und überlegt, wie winzig klein diesen gegenüber der mit undurchdringlicher Materie wirklich angefüllte Raum ist, so kann man, glaube ich, wohl zu dem Resultate kommen, dass die Totalsumme der lebendigen Kraft, welche die in diesem unfassbar grossen Tummelplatz umherfliegenden Aetheratome besitzen, durch die während einer endlichen Zeit vorkommenden Zusammenstösse nur um einen unendlich kleinen Bruchtheil abnehmen könne."

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

innerer Bewegung als absolut starr zu denken sind, so wird damit wieder die Uebertragung der Bewegung selbst unbegreiflich, denn sie müsste in einem Raumpunkte und momentan, d. h. ausser Raum und Zeit, geschehen. Diese letzten Schwierigkeiten will K. Lasswitz in seiner Abhandlung „Atomistik und Kriticismus“[1]) umgehen, indem er die Gesetze des Stosses nicht durch eine anschauliche Construction der Materie, sondern nach Art der kritischen Philosophie aus den erkenntnisstheoretischen Grundbedingungen unserer Auffassung der Bewegungen ableitet. Lasswitz betrachtet also das Problem des Stosses von einem allgemeineren Standpunkte aus als ein Problem der Transformation oder der Uebertragung von Bewegungen. Für alle solche Uebertragungen leitet er allgemein aus dem Beharrungsgesetz den eigentlich damit identischen Satz ab: „Eine Bewegung kann nur aufgehoben werden durch eine gleich grosse entgegengesetzte.“ Zur Beurtheilung der Gleichheit von Bewegungen gehört ein Maass. Solcher Maasse der Bewegung giebt es zweierlei, die Bewegungsmenge $mv$ und die lebendige Kraft $\frac{1}{2}\, mv^2$, je nachdem man die Bewegungen für gleiche Zeiten oder gleiche Wegstrecken vergleicht. Halten wir, wie das nach dem Beharrungsgesetze nicht anders möglich ist, an der bleibenden Grösse der Bewegungen in allen Umwandlungen derselben fest, so müssen auch für alle Transformationen der Bewegung und damit für alle Zusammenstösse von materiellen Theilen die beiden Gesetze gelten: Bei allen directen Uebertragungen von Bewegungen bleibt die Summe der Bewegungsgrössen dieselbe, und in allen directen Uebertragungen von Bewegungen ist die Energie der Bewegung eine constante Grösse[2]). Diese beiden Sätze charakterisiren alle in der Natur vorkommenden Zusammenstösse materieller Theile als elastische. Nur bei Körpern, welche aus Theilen zusammengesetzt sind, kann der Stoss dadurch scheinbar ein unelastischer werden, dass ein Theil der äusseren Bewegung der Körper in innere Bewegung ihrer Theile sich umsetzt und so scheinbar vernichtet wird. Wo aber eine innere Bewegung der Theile nicht möglich ist, wie bei den untheilbaren, starren Atomen, da kann auch keine Umwandlung der Art der Energie und somit auch kein scheinbarer Verlust an solcher stattfinden. Nehmen wir also die Atome der Materie als absolut starr an, so ist damit die elastische Natur ihrer Zusammenstösse von selbst gegeben[3]).

---

[1]) Atomistik und Kriticismus. Ein Beitrag zur erkenntnisstheoretischen Grundlegung der Physik, Braunschweig 1878. Kurd Lasswitz, Prof. am Gymnasium in Gotha.

[2]) Atomistik und Kriticismus, S. 69 bis 95.

[3]) Atomistik und Kriticismus, S. 96 bis 104. Ganz zu denselben Resultaten wie Lasswitz kommen auch F. und N. Mazon im Jahre 1883. (Beiblätter zu Wiedem. Ann. VII, S. 338, 1883, Auszug der Verfasser aus den Nachrichten der St. Wladimir-Universität zu Kiew, Januarheft 1883.)

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Diesen Schlüssen wird man sicher insofern zustimmen müssen, als bei Annahme absolut untheilbarer, starrer Atome ein unelastischer Stoss derselben absolut unmöglich erscheint. Dafür bleiben auch nach den Ausführungen von Lasswitz noch der Begriff untheilbarer, starrer Atome und die Möglichkeit einer Kraftübertragung zwischen solchen Atomen ebenso undenkbar als vorher. Hat das Atom noch eine Ausdehnung, so hat es auch noch Theile und dann ist es undenkbar, dass diese Theile absolut unbeweglich und unverschiebbar sein sollten. Besteht das Atom noch aus Materie, so ist es auch noch zusammengesetzt und in sich beweglich. Der Begriff der Ausdehnung selbst schliesst den der Theilbarkeit in sich, und ein absolut untheilbares, starres Atom könnte kein anderes als ein absolut ausdehnungsloses, ein punktförmiges Atom sein. Damit ist aber der Zweck der absolut starren Atome verfehlt; denn eben den immateriellen Punktatomen, wie sie schon Fechner u. A. gelehrt, wollte man mit der Annahme der starren Atome entgehen. Der Begriff des Atoms im strengsten Sinne liegt ebenso ausserhalb unseres Erkenntnissvermögens als der der letzten Ursache. Letzte, einfache Theile der Materie können wir in unserer Erkenntniss niemals auffinden; denn gehen wir von der Materie aus, so bleibt jeder Theil derselben doch immer Materie und also wieder theilbar; und gehen wir direct von einfachen Theilchen aus, so sind dieselben nur unausgedehnt, punktförmig zu denken, und aus diesen unausgedehnten Punkten werden wir durch keine Synthesis Materie erhalten. Ein letzter Theil der Materie kann niemals in Erscheinung treten, er gehört zu den Gedankendingen, zu den Noumena nach Kant'schem Sprachgebrauch, und durch die Behauptung seiner Realität kommt die Atomistik in ganz dieselbe Art von Widersprüchen, wie sie der vorkritischen Metaphysik eigenthümlich waren.

Indessen hat die Physik auch gar nicht nöthig, den Begriff des Atoms in diesem metaphysischen Sinne zu fassen. Es genügt vollständig, die Atome als die Theile der Materie zu definiren, die für den jetzigen Stand unserer Kenntnisse als absolut einfach sich bewähren, die sich uns also niemals, selbst nicht durch Eigenschaften, die auf verschiedene innere Theilbewegungen schliessen lassen, als aus materiellen Theilen zusammengesetzt anzeigen. Diesem relativen Begriffe der letzten Theilchen oder Atome nach, den die chemische Atomistik schon ganz sich zu eigen gemacht hat, könnten diese Theilchen allerdings ebenso elastisch wie unelastisch sein. Da wir aber eben betont haben, dass in denselben keine inneren Bewegungen wieder sich zeigen dürfen, so ist damit auch gegeben, dass die Theilchen elastisch gedacht werden oder wenigstens die Abweichungen von der vollkommenen Elasticität für uns unmerklich sein müssen. Im Gegentheil würde nach dieser Ansicht gerade dann, wenn man an den Atomen mit Sicherheit

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Eigenschaften der Nichtelasticität constatirt hätte, der Moment gekommen sein, den Begriff Atome von diesen Theilen der Materie auf ihre Untertheile zu übertragen [1]).

Das Atom ist also für uns nur insofern die letzte Einheit der Materie, als wir in demselben irgend eine Heterogenität oder Differenz von Theilen nicht zu erkennen vermögen. Damit erhebt sich die für diese Anschauung besonders schwierige Frage, worin denn eigentlich die Einheiten der Materie ihre Ursache haben und welches die Einheiten bildende Kraft in der Materie ist. Eine Urkraft, die die Theilchen an einander bindet, darf nicht mehr angenommen werden, mit der Materie selbst gegebene, untrennbare Einheiten haben wir auch schon abgewiesen, danach bleibt für die Bildung der materiellen Einheiten ebenfalls nur die einzige Ursache, welche die kinetische Physik als ursprünglich in der Welt wirkend annimmt, die Bewegung. In der That hat man, seit Descartes als einzige Ursache des Zusammenhanges der festen Körper die Trägheit der Theilchen angegeben, immer wieder darauf aufmerksam gemacht, dass durch gemeinsame heftige Bewegungen, in Wasserstrahlen z. B., Erscheinungen starren Zusammenhanges hervorgebracht werden. Eigentlich kinetische Theorien der Individuenbildung in der Materie aber hat erst das Wiederaufleben der kinetischen Physik hervorgerufen. Ueber Dellingshausen's Erklärung der Körperbildung durch Bildung stehender Schwingungen in seiner undulirenden Materie haben wir schon berichtet; bei ihm bildet das Auffinden der Ursachen solcher Differentiationen in dem durchaus homogenen Stoffe eine kaum zu lösende Aufgabe. Secchi versuchte wenigstens aus Atomen zusammengesetztere Systeme rein

---

[1]) Mit dieser Definition des Atoms darf auch der alte Streit über die continuirliche oder discontinuirliche Erfüllung des Raumes durch die Materie geschlossen werden, denn wenn keine kleinsten Theile in der Materie anerkannt werden, so verschwindet im Ideal wenigstens auch alle Discontinuität in derselben. Damit übereinstimmend leitet A. Krause (Das nachgelassene Werk Immanuel Kant's, Frankfurt a. M. und Lahr 1888) auch aus der Kant'schen Philosophie, die doch in strengster Weise die Continuität der Materie verficht, die Ansicht ab, „dass die Atomistik eine berechtigte Form der Untersuchung der Materie sei, sobald man nur den Raum oder die Materie nicht mosaikartig sich seit Ewigkeit getheilt denke, sondern unter Atom jeden beliebig kleinen zu einem Ganzen verbundenen Theil der Materie verstehe". (S. 176.) Krause's Darstellung des nachgelassenen Kantwerkes trifft auch darin mit den neuen Theorien der Materie, wie mit der früher von uns gegebenen Charakterisirung jenes Werkes (Siehe S. 36), zusammen, dass nach ihr die Materie nur als das Bewegte im Raum begriffen werden kann und alle Naturerscheinungen also auf Bewegungen der Materie zurückgeführt werden müssen. Wenn aber dann Krause zur Erklärung der primitiven entgegengesetzten Bewegungen der Materie in letzter Linie noch anziehende und abstossende Kräfte in derselben für nothwendig hält und aus dem Kantwerke deducirt, so wird darüber vielleicht der Physiker, auch wenn er ein Anhänger der Kant'schen Philosophie ist, noch anderer Meinung sein dürfen.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

kinetisch abzuleiten, indem er behauptete, dass zwei rotirende Atome, die in der Richtung ihrer Rotationsachsen auf einander stossen, sich nicht mehr trennen könnten, sondern hinfort vereinigt bleiben müssten, aber auch hiernach wird es schwer sein, sich eine Anschauung sowohl von der möglichen Verschiedenheit als auch von der möglichen Gleichheit der Körper zu machen. Eher würde dies nach einer Theorie von W. Thomson der Fall sein können, weil dieselbe die Annahme einer Menge primitiver gegebener Bewegungsdifferenzen in der Materie erlaubt. Leider ist dieselbe in ihren Annahmen so complicirt und erfordert so künstliche Maschinerien, dass es schwer hält, sie für mehr als ein illustrirendes Beispiel zu nehmen. Helmholtz hatte im Jahre 1858 eine Abhandlung „Ueber Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen“ [1]) veröffentlicht, in der er zeigte, dass in einer Flüssigkeit, deren Theile sich ohne jede Reibung bewegen: 1) kein Wassertheilchen in Rotation kommt, welches nicht von Anfang an in Rotation begriffen war; 2) dass die Wassertheilchen, welche zu einer Zeit derselben Wirbellinie [2]) angehören, auch indem sie sich fortbewegen, immer derselben Wirbellinie angehörig bleiben; 3) dass das Product aus dem Querschnitte und der Rotationsgeschwindigkeit eines unendlich dünnen Wirbelfadens [3]) längs der ganzen Länge des Fadens constant ist und auch bei der Fortbewegung des Fadens denselben Werth behält und dass danach die Wirbelfäden innerhalb der Flüssigkeit in sich zurückkehren müssen oder nur an den Grenzen der Flüssigkeit endigen können. Diese Sätze und einige weitere Folgerungen, die Helmholtz aus denselben gezogen hatte, waren es nun, aus denen W. Thomson im Jahre 1867 [4]) eine rein kinetische Erklärung der untheilbaren und doch ausgedehnten Atome ableiten wollte. Denkt man sich die Welt von einer vollkommenen Flüssigkeit (d. h. einer Flüssigkeit ohne jede innere Reibung) durchaus erfüllt, so können in dieser Flüssigkeit nach den Helmholtz'schen Sätzen ohne einen besonderen Schöpfungsact keine Wirbelringe entstehen, und die einmal in der Welt vorhandenen können nicht anders als durch einen besonderen Schöpfungsact vernichtet werden. Die in der Flüssigkeit einmal vorhandenen Wirbel-

---

[1]) Journ. für reine und angewandte Mathematik LV, S. 25, 1858; auch Wissenschaftliche Abhandlungen I, S. 101.

[2]) „Wirbellinien nenne ich Linien, welche durch die Flüssigkeitsmasse so gezogen sind, dass ihre Richtung überall mit der Richtung der augenblicklichen Rotationsachse der in ihnen liegenden Wassertheilchen zusammentrifft.“ (Wissenschaftliche Abhandlungen I, S. 102.)

[3]) „Wirbelfäden nenne ich Theile der Wassermasse, welche man dadurch aus ihr herausschneidet, dass man durch alle Punkte des Umfanges eines unendlich kleinen Flächenelements die entsprechenden Wirbellinien construirt.“ (Wissenschaftliche Abhandlungen I, S. 102.)

[4]) Edinburgh Trans. XXV, p. 217, 1869: On vortex motion (gel. am 21. April 1867).

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

ringe sind also im natürlichen Lauf der Dinge untheilbar und unzerstörbar, sie halten eine bestimmte Form und zeigen eine gewisse Elasticität in der Art, dass nach einem Zusammenstosse zweier Wirbelringe jeder derselben so lange um seine Gleichgewichtsform oscillirt, bis er dieselbe ganz wieder erhalten hat. Die Wirbelringe können verschiedene Grössen und verschiedene Formen besitzen, sie können einfach in sich zurückkehrende oder auch vielfach gewundene und verschlungene Linien zeigen. Die Wirbelringe üben auch vermittelst des Mediums, in dem sie sich bewegen, selbst auf Entfernungen hin gewisse Wirkungen auf einander aus, sie nähern sich oder entfernen sich selbstthätig von einander, als wenn anziehende und abstossende Kräfte zwischen ihnen thätig wären. Kurz diese Wirbelringe zeigen alle Eigenschaften, welche man von den Atomen der Materie voraussetzt, und es besteht kein Hinderungsgrund, aus solchen Wirbelatomen die Materie zusammengesetzt zu denken.

Es mag dahingestellt bleiben, ob Thomson die Wirbelatome als wirklich existent angenommen hat. Jedenfalls hat er damit an einem Beispiele gezeigt, wie sich die Individualisirung in der Materie nicht durch besondere Kräfte, sondern nur durch besondere Bewegungen erklären lässt. Die kinetische Betrachtungsweise der physikalischen Erscheinungen hat damit einen gewissen Abschluss erfahren. Es hat sich gezeigt, dass im Princip der Definition der Materie als desjenigen, was im Raume sich bewegt, nichts gegenübersteht und zur Erklärung der Kräfte der Materie innere Bewegungen der letzteren wohl genügen [1]). Das kann indessen nur der Anfang der eigentlichen kinetischen Physik sein; denn für diese handelt es sich nicht sowohl um die Möglichkeit einer solchen Erklärungsart im

---

[1]) Gegen die Kinetik als umfassendste physikalische Methode hat sich in neuester Zeit der berühmte Wärmetheoretiker G. A. Hirn in einer schon erwähnten Abhandlung (La notion de force dans la science moderne, Revue scientifique (3) XXXVI, p. 129, 1885) von einem ganz principiellen Standpunkte aus gewandt. Hirn hält dafür, dass ohne elementare Kräfte in der Materie die Uebertragung der Bewegung selbst bei dem einfachen Stosse nicht erklärt werden könne. Auch bei dem Stoss der Atome müsse eine Deformation angenommen werden, durch welche sich eine Spannkraft entwickele, welche dem ruhenden Atom die Bewegung verleihe, die sie der anderen entziehe. Er hält dafür, dass (wie man schon früher betont) Bewegung sich direct niemals in andere Bewegung umsetzen könne, sondern dass dazu ein von der Materie verschiedenes, vermittelndes Element, die Kraft, gehöre, die in dreifacher Weise als Schwerkraft, elektrische und erwärmende Kraft sich offenbart. Indessen hindert nach der eben gegebenen Charakterisirung der Atome nichts, dieselben auch noch deformirbar zu denken, und W. Thomson hat gezeigt, dass auch aus Bewegungen sich elastische Kräfte entwickeln können, ohne dass man solche als primitive Eigenschaften der Materie anzusehen braucht. (Nature XXX, p. 417, 1884.) Jedenfalls erscheint es auch naturwissenschaftlich richtiger, den Theilen der Materie dieselben Erscheinungen wie der ganzen Materie zuzuschreiben, anstatt ihnen Wirkungsfähigkeiten beizulegen, über deren Unbegreiflichkeit auch Hirn kaum unsicher ist.

Allgemeinen, sondern um die Ausführung der Erklärung im Einzelnen, um die Zurückführung jeder einzelnen physikalischen Kraftwirkung auf die ihr im Besonderen zu Grunde liegende innere Bewegungsart der Materie. Diese Arbeit aber hat sich auf einzelnen Gebieten der Physik, wie vor Allem in der Lehre von der Elektricität, noch schwieriger gezeigt als selbst bei der Gravitation, und hierauf gerade ist wohl der Umstand zurückzuführen, dass man sich in neuester Zeit weniger um die vollständige Durchführung der kinetischen Anschauung auf einem Gebiete als vielmehr um die praktische Erprobung ihrer Fruchtbarkeit an speciellen Problemen auf allen Gebieten bemüht hat.

Philosophie der Materie, c. 1860 bis c. 1880.

Die unmittelbar in die Ferne wirkenden Kräfte waren die Brücken, auf denen die ältere Physik über die Schwierigkeiten der Materie sich rettete; ihrer Sicherheit vertraute man so sehr, dass man schliesslich die ganze Materie in Kräfte auflöste. Nachdem man aber kennen gelernt hatte, dass ganze grosse Classen von Wirkungen sich nicht unmittelbar durch Kräfte, sondern mittelbar durch Bewegungen der den Raum erfüllenden Materie verbreiten und dass die Gesetze dieser Wirkungen nicht aus besonderen Kräften, sondern aus besonderen Bewegungen abzuleiten seien, nach dem begann man auch die Materie selbst, ihre Zusammensetzung und ihre innere Gestaltung wieder eifriger in den Kreis der Untersuchungen zu ziehen; und während man früher die Beschäftigung mit den Atomen an einem Physiker ziemlich verdächtig gefunden und die ganze Atomistik wohl mit scheelen Augen angesehen hatte, erhob sich nun im Gegentheil immer stärker der Ruf nach einer Molecularphysik. Die Versuche, auf dem Wege der Speculation zu einer solchen zu kommen, haben wir im vorigen Abschnitt beschrieben; sie konnten indess im günstigsten Falle nur die Grundlagen der neuen Anschauung liefern. Zu dem ganzen Aufbau des neuen Gebäudes, zur Vollendung desselben im Einzelnen, wie selbst zur Verificirung der deductiv erlangten Resultate bedurfte es der sorgfältigsten, langwierigsten Arbeit und des genialsten Erfindungsgeistes der Experimentalphysiker; denn von ihnen wurde nun nicht mehr die blosse Beobachtung der äusseren Vorgänge in der Körperwelt, sondern auch die schwierigere Bestimmung der diesen zu Grunde liegenden inneren Bewegungen in der Materie gefordert.

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

Auf einigen physikalischen Gebieten, wie denen der Optik, der Wärmelehre und der Akustik, hatte diese Methode auch schon ihre Triumphe gefeiert und dadurch gerade die Anerkennung sich errungen. Auf mechanischem Gebiete aber war dieselbe, obgleich man sie vorzugsweise im Unterschied von der dynamischen als die mechanische bezeichnete, noch wenig zur Geltung gekommen. Die Erfolge der Newton'schen Anschauungen in der Mechanik starrer körperlicher Systeme verdunkelten die auf innere Vorgänge in den Körpern gerichteten Untersuchungen, und lange Zeit wusste

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

man Arbeiten über die Volumveränderungen, die durch mechanische Kräfte, wie Zug und Druck, erzeugt werden, sowie über die Wechselwirkungen zwischen festen, flüssigen und luftförmigen Körpern in der Mechanik nicht recht unterzubringen und nicht recht zu würdigen. Wenn nun auch schon seit dem Anfange unseres Jahrhunderts das Interesse an diesen Vorgängen immer langsam gewachsen war, so hat sich dasselbe doch erst in der letzten Zeit unter dem Einflusse der neuen Anschauungen zu verhältnissmässiger Höhe gesteigert und zu allgemeiner Verbreitung durchgerungen. Dass dabei auch in dieser rein mechanischen Molecularphysik die Molecularkräfte noch immer eine grosse Rolle spielen, darf nicht Wunder nehmen; denn erstens bedeuten dieselben vielfach nur Reste alter, gewohnheitsmässig beibehaltener Vorstellungen, und zweitens wird man auch weiterhin immer gezwungen sein, solche Hülfsbegriffe da einzuführen, wo man die ihnen zu Grunde liegenden Bewegungen noch nicht erkannt hat. In der That haben auch nach der kinetischen Physik diese Molecularkräfte als Bezeichnung der Ursachen gewisser Erscheinungen ihre Berechtigung und sogar ihre Nothwendigkeit, sobald dieselben nur nicht als letzte Ursachen, als elementare Kräfte aufgefasst werden.

Schon von Alters hatten die elastischen Eigenschaften der Materie Physikern wie Philosophen Schwierigkeiten bereitet, und selbst die Newtonianischen Physiker hatten meist die Unmöglichkeit eingesehen, die Eigenthümlichkeiten der Elasticität allein aus den Grundkräften der Materie, der Attraction und der Repulsion, abzuleiten. Jetzt trat zu den alten, noch nicht gelösten Räthseln noch ein neues hinzu, das directer auf eine Abhängigkeit der Kraftwirkung von dem Bewegungszustande hindeutete. W. Weber kam im Jahre 1835[1]) auf die jedenfalls auch vor ihm schon vielfach beobachtete Erscheinung zurück, dass nämlich die Formveränderungen, welche elastische Körper durch die Einwirkung äusserer Kräfte erleiden, erst einige Zeit nach dem Eintreten der Kraftwirkung ihr Maximum erreichen und dass diese Körper auch erst längere Zeit nach dem Aufhören der äusseren Beeinflussung ihre frühere Gleichgewichtsform wieder annehmen. Er belegte diese Erscheinung mit dem Namen der elastischen Nachwirkung und erklärte dieselbe durch die Annahme, dass man die Bewegungen der Molecüle elastischer Körper, welche durch äussere Druck- oder Zugkräfte bewirkt werden, in eine fortschreitende Bewegung und in eine Drehung derselben zerlegen könne; dieser Drehung, durch welche die Elasticitätsachsen der Molecüle aus ihrer ursprünglichen Lage in eine den neuen Gleichgewichtsbedingungen entsprechende Lage gebracht würden, müsse eine innere Kraft entgegen wirken, die

---

[1]) Pogg. Ann. XXXIV, S. 247, 1835; vollständig in Pogg. Ann. LIV, S. 1, 1841.

Molecularmechanik. c. 1860 bis c. 1880.

ihrem Wesen nach unbekannt sei, deren Widerstand aber bei jeder Drehung der Molecüle nur sehr langsam überwunden werden könne[1]). An W. Weber schloss sich im Jahre 1849 in einer mathematischen Behandlung der Elasticität Clausius[2]) an. Nach diesem kann die elastische Nachwirkung nicht durch die freiwerdende Wärme erklärt, vielmehr muss die Annahme gemacht werden, dass während der Wirkung der äusseren Kräfte auch Veränderungen im Innern der Körper vor sich gehen. Für den Fall des Gleichgewichts, wenn nur die Nachwirkung vollendet ist, und für die Fälle so schneller Bewegungen, dass die Nachwirkungen gar nicht ins Spiel treten, kann man danach noch immer die von Wertheim und Cauchy benutzten Elasticitätsformeln anwenden. Hat man aber auch die Nachwirkung in Betracht zu ziehen, so muss man die Entwickelungen dahin ändern, dass man bei Bestimmung der Spannung nicht bloss die augenblicklich vorhandenen Zustände der Körper, sondern auch die früheren berücksichtigt. Nach den jetzt gebräuchlichen Formeln müssten die Schwingungen eines Körpers, wenn keine äusseren Hindernisse vorhanden sind, ewig fortdauern. Dem widerspricht aber die Erfahrung, dass Körper verschieden lange tönen, auch ohne äussere Ursache, wovon Weber gezeigt hat, dass man den Grund in der elastischen Nachwirkung finden kann. Wie Weber sucht Clausius den Grund der elastischen Nachwirkungen in Drehungen der Molecüle, wodurch dieselben den auf sie nach verschiedenen Richtungen hin ungleich wirkenden Spannungen etwas folgen. Nur nimmt er dabei nicht gerade eine besondere Kraft, sondern nur die allerdings nicht viel abweichende Annahme zu Hülfe, dass die Drehungen den äusseren Einwirkungen etwas später folgen als die Verschiebungen.

Eigentliche Beachtung fanden indess die Erscheinungen der elastischen Nachwirkung erst nach den grösseren experimentellen Arbeiten von F. Kohlrausch aus den Jahren 1863 und 1866[3]), der sich im Princip aber ebenfalls der Erklärung Weber's anschloss. Er machte zur Vertheidigung der angenommenen Drehung der Molecüle auf die überall zu beobachtende theilweise Rückkehr der Stimmungen der Saiten nach beliebigen Veränderungen ihrer Tonhöhe aufmerksam und betonte, dass dieses nachträgliche Umstimmen der Saiten ohne jede äussere Einwirkung nur erklärt werden könne aus Veränderungen der inneren Spannungen, die wieder nur aus Drehungen der Molecüle, bei denen die

---

1) Pogg. Ann. LIV, S. 9.

2) Ueber die Veränderungen, welche in den bisher gebräuchlichen Formeln für das Gleichgewicht und die Bewegung elastischer Körper durch neuere Beobachtungen nothwendig geworden sind. Pogg. Ann. LXXVI, S. 46, 1849.

3) Ueber die elastische Nachwirkung bei der Torsion, Pogg. Ann. CXIX, S. 337, 1863. Zur Kenntniss der elastischen Nachwirkung, Pogg. Ann. CXXVIII, S. 1, 207 und 399, 1866. F. Kohlrausch, geb. am 14. October 1840, Professor der Physik in Strassburg

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

Mittelpunkte derselben ihre gegenseitige Entfernung nicht ändern, abzuleiten seien. Aus seinen vielfachen und genauen Versuchen abstrahirte er folgende Gesetze der elastischen Nachwirkung: „1) Wenn die Gestalt eines festen elastischen Körpers durch äussere Kräfte geändert wird, so setzen die Molecüle einem Theil der Bewegung (wahrscheinlich der Drehung ihrer Achsen) einen Widerstand entgegen, vermöge dessen der neue Gleichgewichtszustand erst nach langer Zeit erreicht wird . . . Unter günstigen Umständen ist noch nach Monaten die Bewegung deutlich sichtbar . . . 2) Diese elastische Nachwirkung ist nach Grösse und Verlauf bei verschiedenen Substanzen verschieden. Sie ist an allen untersuchten Körpern wahrgenommen, am stärksten an denen organischen Ursprungs . . . 3) Von den dauernden Veränderungen durch Ueberschreitung der Elasticitätsgrenze scheint sie unabhängig zu sein. 4) Die Geschwindigkeit der Gestaltänderung ist allgemein dem Abstande $x$ aus der Ruhelage direct, umgekehrt dagegen einer Potenz der Zeit $t$, von dem Augenblicke der primären Veränderung an gerechnet, proportional . . . 5) Bei der Ausdehnung reducirt sich die Potenz der Zeit allgemein auf die erste, bei der Torsion wenigstens für kleinere Verrückungen, wonach man hat

$$-\frac{dx}{dt} = \alpha \cdot \frac{x}{t} \quad \text{oder} \quad x = \frac{c}{t^\alpha}.$$

6) Die Grösse $\alpha$ hat für verschiedene Substanzen einen verschiedenen Werth, ist aber für denselben Körper constant. Sie kann danach als der Coëfficient der elastischen Nachwirkung bezeichnet werden . . . 7) Die Nachwirkung wächst mit der Temperatur $\tau$. 8) Eine Vermehrung der Temperatur, während die Theilchen sich, vermöge der elastischen Nachwirkung, ihrer endlichen Gleichgewichtslage nähern, erhöht ihre Geschwindigkeit. Durch die Wärme wird demnach entweder der Widerstand vermindert, oder, was wahrscheinlicher sein dürfte, die Kraft, welche die Molecüle in ihre Gleichgewichtsstellung zu drehen strebt, vermehrt [1]). Ohne jedes nähere Eingehen auf die inneren Zustände der Körper versuchte Boltzmann [2]), ähnlich wie Clausius, die elastische Nachwirkung zu behandeln, indem er seinen mathematischen Ableitungen nur die Annahme zu Grunde legte, dass nach gewissen Formveränderungen eines Körpers die früheren Gestalten noch einen gewissen Einfluss auf die derzeitigen Molecularkräfte ausüben, dass dieser Einfluss ein um so geringerer ist, je weiter zurück die früheren Formen liegen, und dass die Erzeugung einer gewissen Formveränderung einer geringeren Kraft bedarf, wenn schon früher eine Aenderung in gleichem Sinne stattgefunden. O. E. Meyer [3])

---

1) Pogg. Ann. CXXVIII, S. 417 bis 419.

2) Wiener Sitzungsber. LXX, S. 275, 1874; Pogg. Ann. Erg. VII, S. 624, 1876.

3) Pogg. Ann. CLI, S. 108, 1874.

schilderte die elastische Nachwirkung als bedingt durch eine innere Reibung der unvollkommen elastischen Körper, welche die elastischen Kräfte auch von der Zeit abhängig macht. Aehnlich bemühte sich F. Neesen[1]), von der molecularen Constitution der Körper ausgehend, die elastische Nachwirkung zu erklären. Nach der mechanischen Wärmetheorie bewegen sich die Molecüle fester Körper in Schwingungen um eine gewisse Ruhe- oder Gleichgewichtslage, die nicht bloss von den Kräften, sondern auch von den Bewegungen der benachbarten Molecüle abhängt. Wird nun das moleculare Gleichgewicht in dem Körper durch Einwirkung äusserer Kräfte gestört, so wird es jedenfalls eine gewisse Zeit dauern, bis die molecularen Bewegungen in der ganzen Masse des Körpers sich dem neuen, durch diese Kräfte mit bedingten Gleichgewichte angepasst haben, und ebenso wird, wenn dieses Gleichgewicht hergestellt war, nach dem Aufhören der äusseren Einwirkung wieder eine bestimmte Zeit verfliessen, bis die alte Gleichgewichtslage wieder erreicht wird. Neesen zeigte, dass die Molecüle eines Stabes nach Vollendung einer Torsion entsprechend seiner Theorie immer noch eine gewisse Zeit lang gewisse Bewegungen nach der neuen Gleichgewichtslage hin ausführen müssen und betonte ausdrücklich, dass auch nach seiner Theorie die Annahmen von Boltzmann ihre Geltung behielten[2]). Dabei blieb freilich die specielle Bestimmung der Molecularbewegungen, welche den verschiedenen, verwickelten Erscheinungen der Nachwirkung entsprechen, eine schwere Aufgabe. In dieser Hinsicht äusserte Kohlrausch Bedenken gegen Neesen's Theorie, indem er neue merkwürdige Beobachtungen über die Nachwirkung verschiedener, einem Körper nach einander ertheilter Deformationen veröffentlichte[3]). Wenn man nämlich einem Körper zuerst eine grössere oder länger andauernde Deformation und darauf eine kleinere und kürzere von entgegengesetztem Vorzeichen mittheilt und dann den Körper sich selbst überlässt, so überwiegt anfangs die frischere Nachwirkung, aber weil sie rascher als die von der älteren Deformation herrührende vergeht, so kann bei geeigneten Grössenverhältnissen nach einiger Zeit die ältere Nachwirkung wieder das Uebergewicht erhalten und die Bewegungsrichtung des Körpers also ohne jede äussere Einwirkung ihr Vorzeichen wechseln. Kohlrausch schliesst die Abhandlung mit den Worten: „Ich kenne wenig so überraschende Vorgänge, wie diese freiwilligen Bewegungsänderungen eines leblosen Körpers. Wennschon die ganze elastische Nachwirkung höchst merkwürdig erscheint und bis jetzt keine befriedigende physikalische Erklärung gefunden hat, so fordert dieses gleichzeitige Bestehen mehrerer Nachwirkungen in einem und demselben Körper unbedingt eine Abänderung der Vorstellungen, welche der gegenwärtigen Elasticitätstheorie zu

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

---

[1]) Pogg. Ann. CLVII, S. 579, 1876. F. Neesen, geb. am 16. Aug. 1849, Prof. a. d. Artillerie- und Ingenieurschule in Berlin.

[2]) Ibid. S. 586.

[3]) Pogg. Ann. CLVIII, S. 337, 1876.

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

Grunde liegen. Durch die freiwillige Umkehr der in einer Richtung erfolgenden Gestaltsänderung in die entgegengesetzte Richtung wird direct bewiesen, dass mit einer und derselben äusseren Gestalt verschiedene Anordnungen der Molecüle verbunden sein können und dass es Kräfte der Elasticität giebt, welche die Gestalt eines Körpers zeitweilig von seiner Gleichgewichtslage entfernen können [1]." In einer grösseren Reihe von Experimenten versuchte F. Braun [2]) wenigstens die Frage zu entscheiden, ob die elastische Nachwirkung auf derselben Bewegungsart der Molecüle wie die elastische Verschiebung beruhe und nur als ein Rest der letzteren anzusehen sei, oder ob die Molecularbewegungen, die beiden zu Grunde liegen, als ganz verschieden anzunehmen seien. Er schloss aus seinen Versuchen das letztere und war auch geneigt, wie Weber und Kohlrausch die Nachwirkung auf eine Verdrehung der Molecüle zurückzuführen, wollte aber zur Erklärung der Verlangsamung dieser Drehung keine besondere Widerstandskraft einführen, sondern dieselbe aus den bekannten Molecularkräften abgeleitet wissen. Bedeutend weiter griff N. A. Hesehus [3]) im Jahre 1882 aus, indem er die elastische Nachwirkung mit anderen bekannten Molecularwirkungen in Zusammenhang zu setzen versuchte. Aus Beobachtungen der elastischen Nachwirkung des Kautschuks mit Hülfe eines selbst registrirenden Apparates meinte er constatiren zu können, dass die Gesetze der elastischen Nachwirkung analog seien den Gesetzen der Erkaltung und Erwärmung fester Körper, der Wasserstoffaussonderung aus dem mit diesem Gase gesättigten Palladium und danach auch der elektrischen Polarisation der Elektroden, ferner den Gesetzen der optischen Nachwirkung oder der Phosphorescenz und den Erscheinungen des elektrischen Rückstandes bei Entladungen und dass die elastische Nachwirkung jedenfalls von dem Ausdehnungscoëfficienten, dem Elasticitätsmodul, der Erwärmung des betreffenden Körpers bei Schwingungen u. s. w. abhängig sei [4]). Seine

---

[1]) Pogg. Ann. CLVIII, S. 374 bis 375.

[2]) Pogg. Ann. CLIX, S. 337, 1876. F. Braun, Professor der Physik in Tübingen.

[3]) Journ. der russischen chem.-phys. Gesellsch. XIV, S. 320, 1882; Auszug des Verfassers in den Beiblättern zu Wiedemann's Ann. VII, S. 654, 1883.

[4]) Einige dieser Analogien sind schon früher betont worden. Auch Kohlrausch sagt in seiner Arbeit vom Jahre 1866 über den Widerstand, den die Molecüle angenommenermaassen der Drehung entgegensetzen: „Er selbst steht umgekehrt in einer innigen Beziehung zu den molecularen Vorgängen oder von dem Standpunkte der Wärmetheorie aus zu den Molecularbewegungen. Eine Reihe von elektrischen Erscheinungen in Isolatoren, unter anderem den elektrischen Rückstand auf die Nachwirkung zurückzuführen, darf zum mindesten nicht aufgegeben werden. Dass manche magnetische Vorgänge mit ihr zusammenhängen, ist, wie Wiedemann (Pogg. Ann. CXXVI, S. 1) bemerkt, nach der gebräuchlichen Theorie des Magnetismus mit Sicherheit zu erwarten. (Pogg. Ann. CXXVIII, S. 2.)

Abhandlung schliesst mit den Worten: „Keine der betreffenden Hypothesen vermag für sich allein alle Erscheinungen der elastischen Nachwirkung völlig zu erklären. Eine vollständige Theorie der elastischen Nachwirkung müsste ausgehen sowohl von der sehr wahrscheinlichen Hypothese einer Auswechselung zwischen dem äusseren und inneren Aether im Körper, als auch von der Hypothese einer inneren Reibung und einer Wechselwirkung der schwingenden Molecüle."

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

Dass die Geschwindigkeiten, mit denen bei einigermaassen starken Kräften die elastischen Verschiebungen vor sich gehen, sehr bedeutende sind, bewies H. Schneebeli durch Messungen der Stosszeit elastischer Körper, d. i. des Zeitraums, während dessen zwei auf einander stossende Körper in Berührung sind. Pouillet hatte 1845 gefunden, dass bei einer sehr kurzen Schlusszeit eines galvanischen Stromes der entsprechende Ausschlag einer Galvanometernadel dieser Schlusszeit selbst proportional war. Schneebeli liess nun im Jahre 1869 [1]) schwere, pendelartig aufgehängte Körper gegen feste Platten schlagen und beobachtete die beim Stoss erfolgenden Schlusslängen eines Stromes, dessen Polenden in den Pendelkörper und die feste Platte eingelassen waren. Für einen Stahlcylinder von 695 g Gewicht, der aus einer Höhe von 33 mm gegen eine feste Stahlplatte schlug, fand er so eine Stosszeit von nur 0,00019 Secunden. Im Allgemeinen zeigte sich die Stosszeit bei dem Stoss gegen dieselbe Fläche der Masse des stossenden Körpers direct und der Quadratwurzel aus dem Elasticitätscoëfficienten umgekehrt proportional, mit wachsender Fallhöhe nahm dieselbe, wie zu erwarten, stark ab.

Alle Untersuchungen über die Elasticität fester Körper führten, wie die mechanische Wärmetheorie, zu dem Ergebnisse, dass auch die Theilchen fester Körper in immerwährender Bewegung und genügend starken Kräften gegenüber ebenso leicht verschiebbar sind wie die Theilchen der Flüssigkeiten gegenüber schwächeren Kräften. In der That gelang es auch, einige Eigenschaften der Flüssigkeiten bis zu einem gewissen Grade ebenfalls an festen Körpern nachzuweisen und damit die bis dahin so streng geschiedenen Aggregatzustände einander mehr zu nähern. So kam H. Tresca [2]) in der Mitte der sechziger Jahre zu dem Resultate, dass feste Körper unter starkem Druck ebenso durch eine Oeffnung in einem Gefäss ausfliessen, wie eine Flüssigkeit unter dem Einfluss der Schwere. In einen hinreichend starken Cylinder, dessen

---

[1]) Pogg. Ann. CXLIII, S. 239 und CXLV, S. 328. Auch M. Hamburger benutzte in neuester Zeit (Wiedem. Ann. XXVIII, S. 653) Pouillet's Methode wiederum zur Messung der Stosszeit.

[2]) Compt. rend. LIX p. 754, 1864; LX, p. 398, 1865; LXIV, p. 809, 1867. Henri Édouard Tresca (12. October 1814 Dünkirchen — 21. Juni 1885 Paris), zuerst Ingenieur, seit 1852 Professor am Conservatoire des Arts et Métiers und seit 1854 auch an der Ecole normale in Paris.

Molecular-mechanik, c. 1860 bis c. 1880.

Boden mit einer kleinen Oeffnung versehen war, legte er eine Anzahl von Bleischeiben über einander. Ein starker auf diese ausgeübter Druck, der in einzelnen Fällen bis auf 100 000 kg stieg, presste dann die Scheiben durch die Oeffnung im Boden in Gestalt eines dünnen Strahles aus. Schnitt man danach die Platten durch, so zeigten sich die einzelnen Schichten in ihrer Deformirung noch durch feine, trennende Linien an, welche erkennen liessen, dass die Bewegung der Bleitheilchen ganz wie bei einer Flüssigkeit vor sich gegangen. Hatten die Metallschichten im Cylinder bis auf eine gewisse Grenze abgenommen, so konnte man an dem ausgetretenen Strahle sogar die bekannte Contraction wahrnehmen. Versuche mit Eisplatten ergaben dieselben Resultate, nur war bei ihnen der ausgetretene Strahl von tiefen Querspalten durchzogen, trotzdem aber doch durchsichtig geblieben. Auch Schmiedeeisen liess sich mittelst eines Dampfhammers von 12 000 kg Gewicht durch eine Oeffnung von 48 mm Durchmesser treiben. Tresca zog aus diesen Versuchen den allgemeinen Schluss, dass jede Formveränderung eines festen Körpers, welche durch äussere Kräfte bewirkt wird, sich auffassen lässt als das Ergebniss eines Fortfliessens der einzelnen Theile, welches ausgeht von den Punkten, wo die Körper dem stärksten Druck ausgesetzt sind, und in derjenigen Richtung erfolgt, in welcher die Hindernisse am geringsten sind. In neuester Zeit hat Tresca diesen Satz durch Deformationen von rechtwinkeligen Parallelepipeden und Cylindern bestätigt. Ein Parallelepipedum, das von zwei parallelen Flächen aus zusammengepresst und dessen Ausdehnung nach zwei anderen Parallelflächen durch feste Wände gehindert wurde, zog sich unter dem Druck zu einem in der freien Richtung verlängerten Parallelepipedum aus; ein Cylinder, den man zwischen zwei ebenen, seine Grundflächen berührenden Platten zusammenpresste, formte sich in einen anderen von grösserem Durchmesser und kleinerer Höhe um, in allen Fällen aber blieben die Volumina vor und nach der Pressung constant [1]).

Zu ähnlichen Anschauungen über das Verhalten fester Körper gegen starken Druck kam um das Jahr 1880 auch W. Spring [2]). Wenn feste Körper durch hohen Druck zum Fliessen gebracht werden können, so ist zu erwarten, dass feste Körper unter hohem Druck zusammenschweissen, dass Gemische aus solchen sich chemisch verbinden, dass sie krystallisiren und dass sie in andere allotropische Modificationen übergehen können. Wirklich fand Spring durch Versuche mit 83 verschiedenen Substanzen diese Vermuthungen bestätigt. Wenn Feilspäne aus Wismuth, Cadmium und Zinn nach dem Verhältnisse der Wood'schen Metalllegirung mit einander gemischt und einem Druck von 7500 Atmosphären ausgesetzt wurden, so entstand ein Metall-

---

[1]) Compt. rend. XCVII, p. 928, 1883; XCIX, p. 104, 1884.

[2]) Bulletin de l'Acad. Roy. Belgique (2) XLIX, p. 323, 1880: Recherches sur la propriété que possèdent les corps solides de se souder par l'action de la pression.

block, der, abermals mit der Feile fein zertheilt und nochmals demselben Druck ausgesetzt, endlich eine legirungähnliche Masse lieferte, die bei 70° C. schmolz. Prismatischer Schwefel ging durch Druck in den dichteren octaedrischen, amorpher Phosphor ebenso in den krystallinischen über u. s. w. Spring hielt danach den Satz für erwiesen, dass jeder Körper, auch wenn man ihm weder Wärme entzieht noch mittheilt, den Aggregat- oder den allotropischen Zustand annimmt, der dem ihm aufgezwungenen Volumen entspricht[1]). In einer späteren Arbeit[2]) gelangte er auch wie Tresca zu der Ueberzeugung, dass ein fester Körper, ohne in einen anderen Aggregatzustand überzugehen, überhaupt nicht bleibend comprimirt oder dilatirt, d. h. nicht in seinem Volumen verändert werden und dass also eine dauernde Deformation eines festen Körpers durch Druck nur in Folge einer zeitweiligen, theilweisen Verflüssigung desselben eintreten könnte. Bei der Prägung einer Münze würde dieser Vorstellung gemäss das Metall nicht unter dem Stempel dauernd zusammengepresst werden, sondern statt dessen aus den vertieften nach den erhabenen Stellen überfliessen, und ebenso müsste auch die dauernde Biegung einer Stange nicht einer theilweisen Volumenveränderung derselben, sondern einem theilweisen Ueberfliessen des Stoffes von der concaven nach der convexen Seite zugeschrieben werden.

Mit der Annahme einer steten Bewegung der Molecüle auch der festen Körper stimmten die Beobachtungen, dass feste Körper unter gewissen Umständen wie Flüssigkeiten und Gase in einander diffundiren. Die Diffusion der Kohle in geschmolzenes Eisen ist seit langer Zeit bekannt. Zufällig aber beobachtete J. Violle[3]) im Jahre 1878 an einem Porcellantiegel, der in einem Graphittiegel stand, eine Diffusion der Kohle auch in Porcellan, und Sidney Marsden[4]) bemerkte, dass die Kohle, welche in einem Tiegel von Berliner Porcellan glühte, stellenweise den letzteren sogar ganz durchdrang. Umfassendere Untersuchungen dieser Diffusion fester Körper stellte indess erst Alb. Colson im Jahre 1881 an[5]). Danach dringt, wenn man in einer reducirenden Atmosphäre Eisen in Kienruss erhitzt, nicht nur die Kohle in das Eisen unter successiver Umwandlung desselben in Stahl, sondern es diffundiren auch beträchtliche Quantitäten des Eisens in die Kohle, und zwar scheint das letztere bei verhältnissmässig niederer Temperatur (250°) noch leichter

[1]) Jannetaz, Neel und Clermont kamen bei einer Wiederholung der Spring'schen Versuche theilweise zu anderen Resultaten und bestritten vor Allem das Krystallisiren unter Einfluss des hohen Druckes. Spring hat dem gegenüber aber seine Ansichten aufrecht erhalten und auf die Gründe aufmerksam gemacht, welche die Misserfolge der anderen Physiker verursacht haben könnten. (Beiblätter zu Wiedem. Ann. VII, S. 752; VIII, S. 103.)

[2]) Bull. de l'Acad. Roy. Belgique (3) VI, S. 507, 1883.

[3]) Compt. rend. XCIV, p. 28, 1882.

[4]) Proceed. of the Roy. Soc. of Edinb. X, p. 712, 1880.

[5]) Compt. rend. XCIII, p. 1074, 1881; XCIV, p. 26, 1882.

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

als das erstere von statten zu gehen. Aehnliche Versuche mit Platin führten zu keinem Resultat, so dass Colson die Diffusion fester Körper, wie auch die von Flüssigkeiten an eine gewisse Affinität der diffundirenden Stoffe gebunden glaubt. Danach beobachtete Colson auch weiter beim Erhitzen eine Diffusion von Chlorsilber in Chlornatrium; künstliches Schwefeleisen, das auf einer Kupferplatte lag, verwandelte sich zu einem kleinen Theile in Schwefelkupfer, und ein Klavierdraht, der mit Kalk in Kienruss erhitzt wurde, nahm deutliche Mengen von Calcium auf. Besonders leicht aber diffundirte Kieselerde durch Kohle, so dass ein mit Kohle umhüllter und in einem Tiegel erhitzter Platindraht bald einen aus dem Tiegel stammenden Gehalt an Silicium zeigte.

Auch das Eindringen von Gasen in Metalle und andere feste Körper, sowie das gänzliche Durchdrungenwerden der letzteren durch die ersteren betrachtete man nun von dem neuen Standpunkte aus mit erhöhtem Interesse. Louyet hatte schon 1849[1]) in dieser Beziehung merkwürdige Beobachtungen gemacht. „Wenn man einen horizontalen, aus einer Capillaröffnung hervortretenden Strom von Wasserstoff auf ein einige Millimeter von dieser Oeffnung vertical gehaltenes Blatt Papier richtet, so geht das Gas durch das Papier. Allein das Gas siebt nicht durch das Papier, wie man wohl glauben könnte, sondern der Strom behält seine Form und kann hinter dem Papier angezündet werden, ganz wie wenn das letztere nicht zwischen dem Gasstrom und dem glühenden Körper aufgestellt wäre. Auch geräth ein Platinschwamm, der hinter dem Papier in der Richtung des Stromes angebracht worden ist, ins Glühen. Der Druck braucht dabei nicht 10 bis 12 cm Wasser zu übersteigen. Wie Papier verhalten sich auch Blattgold und Blattsilber. Auch durch Guttaperchahäutchen geht der Strom, aber nicht merklich durch noch so dünne Glaswände."

In der Mitte der sechziger Jahre aber beschäftigten sich Sainte-Claire-Deville und Troost[2]) im Interesse sanitärer Untersuchungen genauer mit der Durchlässigkeit der Metalle für Gase. Ein gusseiserner Ofen, wie er in Paris zur Heizung der Militärwachtstuben diente, wurde mit einem eisernen Mantel umgeben und aus dem so gebildeten Hohlraum, nachdem der Ofen bis zur dunklen oder hellen Rothgluth angeheizt worden war, die Luft aufgesogen und auf ihren Gehalt an Wasserstoff und Kohlenoxyd untersucht. In 1000 Liter Luft fanden sich dabei 0,23 bis 1,07 Liter Wasserstoff und 0,22 bis 0,71 Liter Kohlenoxyd. Bei einem anderen Versuche zeigte sich, dass Wasserstoff aus geschlossenen Röhren von Gussstahl, die in einem Ofen erhitzt wurden, in kurzer Zeit so gänzlich entwich, dass dieselben fast luftleer wurden.

---

[1]) Bull. de l'Acad. Roy. Belg. XV, p. 297, 1848; Pogg. Ann. LXXVIII, S. 287. P. L. Ch. E. Louyet, 1818 bis 1850, Prof. der Chemie in Brüssel.

[2]) Compt. rend. LXVI, p. 83, 1868; LXVII, p. 965, 1868. Et. H. Sainte-Claire-Deville, 1818 bis 1881, Prof. der Chemie an der Ecole normale und an der Sorbonne in Paris. Louis Troost, geb. 1826, Prof. in Paris.

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

Damit war die Durchlässigkeit der Metalle für Gase bewiesen, und es fragte sich nur, ob man dieselbe als einen Durchgang der Gase durch die Poren der Metalle, oder als eine Absorption des Gases durch das Metall an der einen Seite und ein Abgeben desselben an der anderen erklären wollte. Versuche von L. Cailletet[1]) sprachen für die erstere Ansicht. Dieser nietete dünne Eisenbleche mit den Rändern so zusammen, dass in der Mitte ein Hohlraum blieb; ein dünnes, in diesen Hohlraum eingeführtes kupfernes Rohr diente zum Fortleiten der Gase aus dem Hohlraum. Wenn dann dieser Eisenbehälter in Schwefel- oder Salzsäure eingesetzt wurde, so stiegen nach einiger Zeit aus dem kupfernen Rohre Gasblasen von reinem Wasserstoff auf. Cailletet erklärte, dass diese Gasblasen durch die in das Eisen eingedrungene Säure in dem Eisen entwickelt worden wären und dann, da ihnen der Weg nach aussen von der Säure versperrt, nach innen durch das Eisen hindurchgegangen seien. Er hält danach das Eisen auch bei gewöhnlicher Temperatur für Gase durchlässig, und da die Gasentwickelung proportional der Oberfläche des eingetauchten Eisensacks sich zeigte, so schien es, als ob der Strom des Gases nicht von einer besonderen Kraft bewirkt werde, sondern frei durch die Poren des Eisens hindurchginge. Solchen Folgerungen aber widersetzte sich Th. Graham, der sich vorher schon mehrfach mit der Absorption der Gase durch die Metalle beschäftigt hatte. Er behauptete[2]), dass der Durchgang des Wasserstoffs durch das dünne Eisenblech bei der niederen Temperatur der Cailletet'schen Versuche nur durch die Säure selbst bewirkt sein könne; denn Wasserstoff werde allerdings in ziemlicher Menge vom Eisen bei dieser Temperatur absorbirt, aber erst bei sehr hoher Temperatur, die fast bis zur Rothgluthhitze steigen müsse, wieder abgegeben. Aehnliche Verhältnisse aber herrschen nach ihm auch bei den anderen Metallen, dem Platin und sogar bei dem Palladium, das am stärksten von allen Metallen den Wasserstoff absorbirt. In der Form eines schwammigen Pulvers saugt das Palladium 655 Volumina Wasserstoff auf, lässt aber bei gewöhnlicher Temperatur selbst im Vacuum nichts von diesem Gase entweichen und verliert dasselbe erst, wenn die Temperatur bis 100° gesteigert worden ist. „Ich bin daher zu glauben geneigt, sagt er, dass dem Durchgang des Wasserstoffs durch ein Metall immer eine Verdichtung oder Einsaugung des Gases vorangeht. Man muss jedoch annehmen, dass die Schnelligkeit der Durchdringung nicht proportional ist dem Volumen des eingesogenen Gases, sonst würde das Palladium viel permeabler sein bei niederer als bei höherer Temperatur. Eine Palladiumplatte wurde bei 267° ihres Wasserstoffs vollständig beraubt; allein nichtsdestoweniger blieb sie permeabel; und ihre Permeabilität stieg sogar noch bei höheren Tempe-

[1]) Compt. rend. LXVI, p. 847, 1868. L. Cailletet, Akademiker in Paris.

[2]) Einsaugung des Wasserstoffs durch Metalle, Pogg. Ann. CXXXIV, S. 321, 1868; auch Compt. rend. LXVI, p. 1014, 1868.

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

raturen. Die bei höheren Temperaturen von dem Metall zurückbehaltene Wasserstoffmenge kann nicht merklich sein; allein dess ungeachtet glaube ich, dass eine vorhanden ist, und dass durch das Metall hindurch eine Art von rascher Cementation stattfindet [1])." Die angeführte Thatsache, dass Palladium bei 267⁰ allen Wasserstoff abgiebt und trotzdem immer durchlässiger wird, spricht allerdings in gewissem Grade gegen die Meinung Graham's, denn es ist immerhin schwer anzunehmen, dass das Metall bei einer Temperatur, wo es allen Wasserstoff abgiebt, doch dabei noch immer solchen absorbirt. Graham indessen machte geltend, dass Kautschuk, trotzdem es bei gewöhnlicher Temperatur allen absorbirten Wasserstoff verliert, doch für denselben stark und sogar stärker durchlässig ist, als für Kohlensäure, die es in grösserem Maasse zurückhält [2]). Auch machte er darauf aufmerksam, dass mit dem freien Durchgang der Gase durch die Poren der Metalle jedenfalls die Thatsache nicht stimmt, dass die Metalle nicht für alle Gase, sondern, so viel bekannt, nur für Wasserstoff und Kohlenoxydgas durchlässig sind und dass hierin der Durchgang der Gase durch Metalle der Diffusion der Flüssigkeiten durch Membranen ähnlich ist, bei der auch eine Anziehung und eine Ausstossung der Flüssigkeiten zu gleicher Zeit stattfindet.

Ueberhaupt behandelte Graham die Absorption der Gase durch die Metalle auf eigene Weise, nicht als eine rein mechanische Wirkung der äusseren und inneren Oberflächen, sondern mehr als eine Art von chemischer Verbindung. Da die Absorption von Wasserstoff die physikalischen Eigenschaften des Palladiums, die Dichte, die Zähigkeit, die Leitungsfähigkeit desselben für Elektricität vielfach verändert, da der absorbirte Wasserstoff ebenfalls nicht wie freier Wasserstoff wirkt, so dachte sich Graham die Vereinigung der beiden Stoffe als eine Legirung des Palladiums mit einem anderen Metall, als dessen Dampf der gewöhnliche Wasserstoff zu betrachten sei [3]). Diese

---

[1]) Pogg. Ann. CXXXIV, S. 328.

[2]) Die Thatsache, dass Kautschuk für Gase durchlässig ist, hatte Peyron im Jahre 1841 angegeben und experimentell bestätigt (Compt. rend. XIII, p. 820; Pogg. Ann. LVI, S. 587); nach ihm wird diese Durchlässigkeit durch Maceriren des Kautschuks mit Leinöl fast ganz aufgehoben.

[3]) Ueber das Verhalten des Wasserstoffs zum Palladium, Pogg. Ann. CXXXVI, S. 317, 1869; aus Compt. rend. LVIII, p. 101. Neue Beobachtungen über das Hydrogenium, Pogg. Ann. CXXXVIII, S. 49, 1869; aus Compt. rend. LVIII, p. 1511. Wasserstoff in Meteormassen hatte Graham schon früher (Compt. rend. LIV, p. 1067; Pogg. Ann. CXXXI, S. 151, 1867) nachgewiesen, dieselben wären also auch als Legirungen aus Eisen und dem Metall Hydrogenium zu betrachten. Ein Stück der Meteoreisenmasse von Lenarto, das mit heisser Kalilauge, dann mehreremal mit Wasser gewaschen und schliesslich mit Hülfe eines Sprengel'schen Aspirators so viel als möglich luftleer gemacht worden war, entwickelte beim Glühen immer noch das 2,85 fache seines Volumens an Gas, das zu 86 Proc. aus Wasserstoff bestand. Graham's Versuche über die Absorption der Gase durch die Metalle wurden durch

Ansicht hat danach bei den Physikern wie den Chemikern vielseitige und oft enthusiastische Zustimmung gefunden. Da aber mit dem Namen Metall dem Wasserstoff selbst keine neue Eigenschaft zugelegt worden und da die Legirungen ihrem Wesen nach auch nicht weiter bekannt waren, so brachte die ganze Idee Graham's doch nur wenig oder gar keinen Nutzen.

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

Die Erklärung der Durchlässigkeit der Metalle für Gase aus einer Absorption der Gase durch die Metalle hatte mit allen anderen Diffusionserscheinungen die Schwierigkeit gemeinsam, dass man über die Art der wirkenden Kräfte, ob sie rein mechanische oder zum Theil auch chemische seien, nicht im Reinen war. Die Absorption der Gase aber wird selbst bei rein oberflächlichen, mechanischen Wirkungen dadurch besonders complicirt, dass sie immer mit einer Verdichtung verbunden ist, die auch auf die Absorption selbst zurückwirkt. Theod. de Saussure[1]) hatte im Jahre 1812 bemerkt, dass die Absorption eines Gases durch poröse Körper immer von einer Wärmeentwickelung begleitet wird. E. Mitscherlich[2]) vermuthete, dass die von Kohle absorbirten Gase in derselben im flüssigen Zustande sich befänden. Favre und Silbermann bewiesen im Jahre 1853[3]) direct aus der Absorptionswärme, dass die Dichte der an der Oberfläche fester Körper absorbirten Gase, wie der Kohlensäure und der schwefligen Säure, grösser sein müsse als die Dichte dieser Stoffe im flüssigen und vielleicht auch im festen Zustande. Quincke[4]) ging um dieselbe Zeit von der Annahme aus, dass die an der Oberfläche eines festen Körpers haftende Gasschicht in der Nähe dieser Fläche von gleicher Dichte mit derselben sei und von da an in der Dichte bis zu der Dichte der umgebenden Gasatmosphäre abnähme, was zu dem Satze leitete, dass die Verdichtung der Gase an einem festen Körper der Dichte dieses Körpers selbst

---

J. B. Hannay im Jahre 1881 bestätigt (Proc. of the Roy. Soc. XXXII, p. 407, 1881). Hannay fand bei seinen Versuchen über die künstliche Herstellung von Diamanten, dass häufig Wasserstoff und Kohlenwasserstoffe aus Röhren mit 2 Zoll dicken Wänden scheinbar verschwanden, ohne dass man mit der hydraulischen Presse eine Undichtigkeit der Röhren nachweisen konnte. Dieses Verschwinden erwies sich aber als eine Absorption. Andere feste Körper, wie Glas, absorbirten auch Sauerstoff und Kohlensäure und zwar noch bei einer Temperatur von über 200° und bei einem Druck von 200 Atmosphären reichlich. Die Gase wurden auch beim Abkühlen unter bleibendem Druck festgehalten und entwichen nur bei einer Steigerung der Temperatur.

[1]) Sur l'absorption des gaz par différents corps, Ann. de chim. et de phys. XLIX et L, 1812; Gilb. Ann. XLVII, S. 113, 1814.

[2]) Ann. de chim. et de phys. (3) VIII, p. 18, 1844. E. Mitscherlich, 1794 bis 1863, Prof. der Chemie in Berlin.

[3]) Ann. de chim. et de phys. (3) XXXVII, p. 406, 1853. P. Chappuis (Arch. des scienc. phys. et nat. (3) VI, p. 225, 1881) hat in neuester Zeit diese Angaben bestätigt; nach ihm ist die Wärme, welche bei der Absorption eines Gases durch eine Flüssigkeit entsteht, in der Regel niedriger als diejenige, welche bei der Absorption desselben Gases durch einen festen Körper erzeugt wird, immer aber noch höher als die Verflüssigungswärme dieses Gases.

[4]) Pogg. Ann. CVIII, S. 326, 1859.

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

proportional ist. Fr. Weber kam im Jahre 1872[1]) zu dem Resultate, dass die Mengen verschiedener Gase, welche auf der Oberfläche eines festen Körpers verdichtet werden, oder die sogenannten Wandschichten, den Quadratwurzeln aus den Dichtigkeiten direct und den Moleculargeschwindigkeiten mithin umgekehrt proportional sind. O. E. Mayer fand 1877[2]) dieses Gesetz mit den Anschauungen der kinetischen Gastheorie wohl vereinbar. Nach ihm ist das Haften der Gastheile an festen Körpern entweder aus anziehenden Kräften zu erklären, welche die aufschlagenden Theilchen an der Wand zurückhalten, oder auch auf die Weise zu erläutern, dass die leichten Gasmolecüle im Zusammenstosse mit den gröberen Molecularaggregaten der festen Wand ihre kinetische Energie oftmals ganz und gar einbüssen und so bis zu einem neuen Stosse, der sie wieder in Bewegung setzt, eine Zeit lang in Ruhe an der Wand verbleiben. Nach beiden Ansichten ist zu denken, dass nur die langsamer bewegten Gasmolecüle in den Fall kommen können, ihre Geschwindigkeit ganz einzubüssen, während die rascher dahinfahrenden sich immer Energie genug bewahren, um von der Wand wieder abzukommen, und daraus vermag dann O. E. Mayer zu deduciren, dass die Absorption der mittleren Moleculargeschwindigkeit umgekehrt oder was dasselbe ist, der Dichte der Gase direct proportional sein muss. Bei der experimentellen Messung der Gasabsorption an Glasfäden fand indess H. Kayser[3]) dieses Gesetz nicht bestätigt. Welche Quantität eines Gases absorbirt wird, das hängt nach ihm erstens von der Dichte der Gasschicht an der Wand, die durch die Wechselwirkung zwischen Wand und Gas bestimmt wird, und zweitens von der Dicke der verdichteten Gasschicht ab, die durch die Natur des Gases selbst bedingt ist. Noch weiter zurückgehend zeigt sich die erstere Erscheinung verursacht durch die an der Oberfläche des Körpers freien Molecularkräfte, wie durch die chemische Affinität zwischen Wand und Gas, die letztere aber abhängig von der Entfernung der Gasmolecüle, von der Moleculargeschwindigkeit, von der Temperatur und endlich auch von der Cohäsion des Gases. Die Versuche bestätigten, dass erhöhter Druck die Absorption vergrössert, erhöhte Temperatur dagegen sie verkleinert und dass dieselbe vor Allem von der Natur des Gases abhängt, indem leichter condensirbare Gase auch immer starke Absorption

---

[1]) Tageblatt der 45. Naturf.-Versammlung, Leipzig 1872, S. 113.

[2]) Kinet. Theorie der Gase, Breslau 1877, S. 309.

[3]) Heinr. Kayser, Prof. in Hannover: Ueber die Verdichtung von Gasen an Oberflächen in ihrer Abhängigkeit von Druck und Temperatur, Wiedem. Ann. XIV, S. 450, 1881. „Den wichtigen Schritt, sagt Kayser, von porösen Körpern mit unbekannter Oberfläche zu Bündeln von Glasfäden mit bekannter Oberfläche hat Magnus (Pogg. Ann. LXXXIX, S. 604, 1853) gemacht."

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

zeigten. Feste, allgemeine Gesetze aber waren der Complicirtheit der Wirkungen wegen nicht zu erhalten.

Theilweis ganz entgegengesetzte Resultate erhielt R. Bunsen[1]), indem er ein neues Element, die Zeit, in die Betrachtungen einführte. Bunsen gebrauchte bei seinen Versuchen (ähnlich wie Kayser) capillare Glasfäden, wie sie in der Glasweberei gebräuchlich sind, bei denen 150 g einer Fadenlänge von 62 geographischen Meilen entsprechen und 23 qm Oberflächen darbieten, dabei aber nur 100 ccm Volumen haben und also so wenig innere Absorption als nur möglich zulassen. Durch Beobachtungen der Absorption von Kohlensäure ergaben sich dann die folgenden Gesetze: „1) Ein stationärer Zustand der Gasverdichtung wird keineswegs nach wenigen Stunden oder Tagen, sondern nicht einmal nach mehreren Jahren erreicht. 2) Während der dreijährigen Dauer des Versuchs fand trotz der instantanen und allmäligen Druck- und Temperaturänderungen niemals eine bemerkbare Loslösung der an der Gasoberfläche verdichteten Kohlensäure statt. 3) Plötzliche Aenderungen des Quecksilberdruckes von 0,3521 auf 0,5696 m, von 0,5450 auf 0,7171 m, von 0,7168 auf 0,5355 m, von 0,4431 auf 0,5248 m lassen keine Veränderung im stetigen Verlaufe der Gasverdichtung erkennen. 4) Innerhalb eines Temperaturintervalles von + 23° bis — 0,8° C. erfolgt mit steigender Temperatur eine Beschleunigung, mit abnehmender eine Verzögerung der Gasverdichtung. 5) Die 13,628 qm grosse Glasoberfläche hatte an Kohlensäure aufgenommen nach Ablauf des ersten Jahres 42,91 ccm, nach Ablauf des zweiten Jahres 57,94 ccm und nach Ablauf des dritten Jahres 69,98 ccm; also im ersten Jahre 42,91 ccm, im zweiten 15,03 ccm und im dritten 12,04 cm. Es wurden mithin in drei Jahren auf 1 qm Glasfläche verdichtet 5,135 ccm von 0° und 0,76 m Druck[2])." Bunsen erklärt die Abweichung dieser Sätze von allen früher erhaltenen Resultaten aus der Unrichtigkeit der sonst immer festgehaltenen Voraussetzung, dass das Maximum der Gasverdichtung schon nach wenig Stunden oder Tagen erreicht werde, wonach man dann alle folgenden Veränderungen der Absorption den Veränderungen des Druckes oder der Temperatur zugeschrieben habe. Auch die naheliegende Vermuthung, dass man es hier gar nicht mit einem Adhäsionsphänomen, sondern lediglich mit einer chemischen Zersetzung des Glases zu thun habe, weist Bunsen zurück, weil das schwache Kohlensäureanhydrid unmöglich die Silicate des Glases zerlegen könne. Danach bleibt nach ihm nur die folgende rein mechanische Erklärung der Erscheinungen. „Wie sich

[1]) Wiedem. Ann. XX, S. 545, 1883. Rob. Wilh. Bunsen, geboren am 31. März 1811 in Göttingen, Professor der Chemie 1838 in Marburg, 1851 in Breslau und seit 1852 in Heidelberg.

[2]) Auf die unter dem Quecksilberdruck von 0,99 mm an den Glaswänden noch anhaftenden Gase ist dabei keine Rücksicht genommen. (Wiedem. Ann. XX, S. 555 bis 556.)

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

eine gravitirende, feste oder flüssige Masse mit einer Gasatmosphäre von abnehmender Dichtigkeit umgiebt, ebenso müssen sich auch in Folge capillarer Anziehungen auf der Oberfläche fester oder flüssiger Körper Gasanhäufungen von abnehmender Dichtigkeit einstellen, und da sich diese von der Oberfläche ausgehenden Anziehungen nach Quincke's Untersuchungen noch bis auf Entfernungen von 0,000005 cm verfolgen lassen, so müssen sich die auf 10 000 qcm Glasoberfläche im Verlauf von drei Jahren verdichteten 5,135 ccm Kohlensäure von 0° und 0,76 m Quecksilberdruck in einem Raume von 0,05 ccm befunden, also zum mindesten eine Verdichtung von 5,135 auf 0,05 ccm erlitten haben. Einer solchen Verdichtung entspricht aber ein Druck von 102,7 Atmosphären. Da die Kohlensäure bei der Beobachtungstemperatur 19° C. schon unter einem Druck von 57,5 Atmosphären flüssig wird, so kann es keinem Zweifel unterliegen, dass die Glasoberfläche mit einer Schicht flüssiger Kohlensäure bedeckt war. Wäre das ganze zu 5,135 ccm bestimmte Gasvolumen als Flüssigkeit vorhanden gewesen, so würde, da das specifische Gewicht der liquiden Kohlensäure bei 19° C. 1,137 ist, die Dicke dieser Schicht unter einem Atmosphärendruck nur 0,000008 mm betragen haben. Man begreift aber leicht, dass diese Schicht in Wirklichkeit niemals über diejenige Höhe hinaus anwachsen kann, in welcher der mit der Entfernung abnehmende, capillare Druck der Dampftension der liquiden Kohlensäure gleich geworden ist, und dass oberhalb dieser Höhe noch eine gasförmige Kohlensäureatmosphäre von abnehmender Dichtigkeit vorhanden sein muss. Diese Erwägungen erklären zwar die beobachtete Verdichtung des Gases, aber nicht die auf jahrelange Zeiträume ausgedehnte Dauer derselben. In Uebereinstimmung mit der Erfahrung fordert vielmehr die Theorie ein instantanes Eintreten des Gleichgewichtszustandes in von Druckkräften beeinflussten Gasmassen. Die lange Dauer der Gasverdichtung wird daher kaum anders als durch die Annahme begreiflich, dass die Glasmasse für Gase nicht völlig undurchdringlich sei und dass die Theilchen der liquiden Kohlensäure bei dem Eindringen in die molecularen Interstitien des Glases einen Widerstand zu überwinden haben, der sich, wie der beobachtete Verlauf der Gasverdichtung zeigt, in einem mit der Zeit wachsenden Verhältniss steigert. Nur noch weiter fortgesetzte Beobachtungen können darüber entscheiden, ob es einen Zeitpunkt giebt, wo das Eindringen der flüssigen Kohlensäure in die Glasmasse als verschwindend klein betrachtet werden darf. Ist ein solcher Punkt erreichbar und erreicht, so müssen die Vorgänge der Gasverdichtung wesentlich andere werden: Die Dicke der flüssigen Kohlensäureschicht wird dann nicht mehr durch Eindringen derselben in das Innere der Glasmassen unter Höhenzunahme der überlagernden Kohlenatmosphäre stetig verringert. Mit der nun im Verlaufe der Verdichtung an Höhe zunehmenden Flüssigkeitsschicht wird

vielmehr die überlagernde Kohlensäureatmosphäre an Höhe abnehmen und sich mithin auch der Druck, welcher von dieser Atmosphäre auf die Flüssigkeitsoberfläche ausgeübt wird, stetig verringern, bis ein Druck an der Oberfläche der Flüssigkeit erreicht ist, welcher dem durch die Tension des Kohlensäuredampfes bei der herrschenden Temperatur ausgeübten Drucke gleichkommt. In dem Augenblicke, wo dieser Punkt erreicht ist, wird unter übrigens gleichbleibenden Umständen weder Condensation noch Verdampfung an der flüssigen Kohlensäureschicht weiter erfolgen können, dagegen sogleich wieder eintreten, wenn Druck und Temperatur sich ändern.“ Uebrigens erwähnt Bunsen am Schlusse seiner Abhandlung noch, dass atmosphärische Luft sich gegen glatte Glasflächen ähnlich wie Kohlensäure verhält, dass sich dagegen bei Kohle und ähnlich porösen Körpern schon nach verhältnissmässig kurzer Zeit stationäre Zustände der Gasanhäufung einstellen. Diese Resultate Bunsen's blieben nicht ohne Einwände. Vor Allem machte Kayser [1]) gegen sie geltend, dass die vermeintlich in das Glas eingedrungenen Kohlensäuremengen sehr viel wahrscheinlicher von den Fettdichtungen der Glasapparate absorbirt und durch dieselben diffundirt sein möchten. Bunsen wies diesen Einwurf durch Versuche mit Apparaten ohne gefettete Einschleifungen zurück [2]), nahm aber danach Gelegenheit, in einer folgenden Arbeit [3]) den Einfluss genauer zu untersuchen, welchen die auf den Glasoberflächen etwa condensirten Feuchtigkeitsschichten, die sich trotz sorgfältiger Austrocknung erhalten, auf die Gasverdichtung ausüben. Er fand in der That, dass erst bei einer Temperatur von 503° C. die auf den Glasfäden haftenden Feuchtigkeitsschichten nach und nach verdampften, während trotz allen Austrocknens der Fäden durch lang anhaltende, trockene Luftströme bei einer Temperatur von 215° noch immer eine Wasserschicht von 0,00000645 mm, bei 107° eine solche von 0,00000703 mm und bei 23° eine solche von 0,00001055 mm Höhe übrig blieb. Der Einfluss dieser Wasserschichten muss also bei Temperaturen unter 500° ein immerhin bedeutender sein, indess zeigte sich, dass gerade bei diesem Einfluss die in der ersten Arbeit Bunsen's gegebenen Gesetze und Erklärungen der Gasverdichtung unverändert gültig blieben.

Aehnliche Unsicherheit über die Natur der wirkenden Kräfte wie hier zeigte sich bei den Anschauungen von dem Wesen der Lösungen der festen Körper in Flüssigkeiten und von ihrer Stellung zwischen mechanischen Mischungen und chemischen Verbindungen. Die dauernde, unveränderliche Beständigkeit der Lösungen deutete auf eine Annäherung derselben an die chemischen Verbindungen hin. Einige Physiker wollten zwar beobachtet haben, dass sich die gelöste Substanz, wenn auch nur langsam, so doch sicher aus der Lösungsflüssigkeit wieder

---

[1]) Wiedem. Ann. XXI, S. 495, 1884.

[2]) Ibid. XXII, S. 145, 1884.

[3]) Ibid. XXIV, S. 321, 1885.

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

absetze. Die bei weitem überwiegende Mehrzahl der Physiker aber blieb bei der gegentheiligen Ansicht, und A. Lieben wies z. B. im Jahre 1857 [1]) nach, dass eine Kochsalzlösung, die in einem verticalen, 2 m langen zugeschmolzenen Glasrohre vier Monate lang gestanden hatte, nach der Oeffnung des Rohres in allen Theilen noch ganz dasselbe Verhältniss von Salz und Flüssigkeit wie im Anfange des Versuchs zeigte. W. Alexejeff [2]) versuchte die Stellung der Lösungen zwischen Mischungen und Verbindungen aus den Wirkungen der Molecularkräfte zu erklären. Die Lösungen sind nach ihm Producte der rein physikalischen Wechselwirkung ihrer Bestandtheile. Sie sind vor Allem durch die Cohäsion des zu lösenden Körpers bedingt; denn je schwächer die Cohäsion, desto grösser die Löslichkeit. Bewirkt aber werden sie von der Adhäsion, die Lösung von Gasen ist der Adhäsion der Gase an festen Körpern analog; Flüssigkeiten von sehr verschiedener Cohäsion adhäriren nicht und lösen sich auch nicht; feste Körper besitzen immer eine geringere Löslichkeit als Flüssigkeiten und lösen sich (wegen des Gleichgewichts zwischen Adhäsion und Cohäsion) nur in einem bestimmten Verhältniss. Lösungen zweier Flüssigkeiten verhalten sich zu flüssigen Gemischen wie isomorphe Gemenge zu Legirungen. Uebersättigte Lösungen sind solche, in denen der gelöste Stoff überkühlt ist. H. Le Chatelier [3]), der in mehreren Abhandlungen um das Jahr 1885 die Gesetze des chemischen Gleichgewichts deductiv aus einfachen Voraussetzungen abzuleiten sich bemühte, kam dabei auch auf die Gesetze der Lösungen. Aus der abgeleiteten Formel $\frac{dx}{x} = \frac{k}{\delta} \cdot Q \cdot \frac{dt}{T^2}$, wo $x$ den Löslichkeitscoëfficienten, $Q$ die Lösungswärme bei der Sättigung und $t$ die Temperatur der Lösung bedeuten, folgte dann wenigstens die schon länger als richtig erkannte Regel, dass die Aenderung $\frac{dx}{dt}$ der Löslichkeit eines Salzes gleiches Vorzeichen mit der Sättigungswärme $Q$ hat, d. h., dass die Löslichkeit bei allen den Körpern mit der Temperatur wächst, die bei der Lösung Wärme absorbiren und umgekehrt.

Wie bei der Auflösung waren umgekehrt auch bei dem Auskrystallisiren der Salze aus ihren Lösungen die wirkenden Ursachen noch nicht bestimmt erkennbar. H. Baumhauer [4]) gab im Jahre 1868 an, dass, abgesehen von stärkerer Abkühlung oder fortgesetzter Verdunstung der Lösungsflüssigkeit, die übersättigten Salzlösungen nur durch Berühren mit Theilchen eines gleichen oder eines isomorphen Salzes zum Auskrystallisiren gebracht werden könnten.

---

[1]) Liebig's Ann. CI, S. 77, 1857. A. Lieben, geb. am 3. Dec. 1836, Prof. der Chemie an der Universität Wien.

[2]) Ber. d. deutsch. chem. Gesellsch. XVI, S. 2273; XVII, S. 38, 1884.

[3]) Compt. rend. XCIX, p. 786; C, p. 50 u. 441; CI, p. 1005 etc., 1885.

[4]) Erdmann's Journ. f. prakt. Chemie CIV, S. 449.

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

Ch. Tomlinson behauptete in demselben Jahre [1]), dass das Auskrystallisiren bewirkt würde durch Berühren mit Oberflächen, welche mit organischen Stoffen, mit fettigen oder öligen Ueberzügen verunreinigt seien und durch welche die Oberflächenspannung in den Lösungen verändert werde. Dem Letzteren gegenüber vertheidigte Liversidge [2]) ähnliche Ansichten wie Baumhauer, da nach seinen Versuchen als Kerne für das Auskrystallisiren nur Krystalle desselben Salzes wirkten. Solche Kerne finden sich wohl in der Luft schwimmend vor und gelangen von da aus in die Lösung oder haften auch leicht an fettigen, öligen, dünnen Ueberzügen der Körper und bewirken so die Krystallisationserscheinungen, welche Tomlinson beobachtet. Jedenfalls aber zeigen dickere Schichten von Oel oder Fett, welche die Flüssigkeiten bedecken, sich gerade als das beste Mittel, um das Auskrystallisiren einer übersättigten Lösung zu verhindern. Zu ähnlichen Resultaten gelangte dann auch Gernez [3]), der schon im Jahre 1866 [4]) entsprechend gefunden, dass feste Körper beim Eintauchen in Flüssigkeiten die in diesen gelösten Gase nur entwickeln, wenn die Oberflächen derselben selbst mit Gas bedeckt sind, dass aber nach dem Entfernen dieser Gasschichten auch die Gasentwickelung unterbleibt. Diese Vorgänge erinnern in entfernter Weise allerdings an die Resonanz der Schwingungsbewegungen, wo eine Bewegung immer von einem Stoff nur angenommen wird, wenn die Theile desselben nach ihrer Lage und ihren Eigenschaften eingestimmt sind. Indessen ist doch wahrscheinlich, dass in einem gelösten Stoffe immer eine gewisse Tendenz nach dem festen Gleichgewichtszustande besteht und dass eine übersättigte Lösung auch durch heterogene Stoffe zum Krystallisiren zu bringen ist, wenn nur der betreffende Stoff überhaupt das moleculare Gleichgewicht der Lösung durch neue Molecularkräfte oder -bewegungen aufzuheben vermag.

Wie eine Verdichtung der Gase an festen Körpern, so schien ein genaueres Studium der Capillarerscheinungen auch auf die Möglichkeit einer Verdichtung der Flüssigkeiten an den Oberflächen fester Körper hinzudeuten. Im Jahre 1857 erschien in den Comptes rendus [5]) eine kurze Mittheilung von Wertheim über Capillaritätserscheinungen, die 1861 in den Annales de chimie et de physique [6]) aus seinem Nachlass vervollständigt wurde und in der Wertheim nachwies, dass die Grundlagen der Capillaritätstheorie bei Young und Laplace insofern ungenau seien, als diese Physiker eine Proportionalität

---

[1]) Proc. of the Roy. Soc. XX, p. 41, auch p. 342, 1868.
[2]) Ibid., p. 497.
[3]) Compt. rend. LXXV, p. 1705, 1872.
[4]) Compt. rend. LXIII, p. 217, 1866.
[5]) Compt. rend. XLIV, p. 1022.
[6]) Ann. de chim. et de phys. (3) LXIII, p. 129.

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

des gehobenen Flüssigkeitsvolumens und der Länge der Berührungslinie zwischen der Flüssigkeit und dem festen Körper annahmen. Laplace hatte angegeben, dass die von parallelen, ebenen Platten gehobenen, für die Längeneinheit der Berührungslinie berechneten Volumina einer Flüssigkeit immer gleich und die in Röhren gehobenen Flüssigkeitsmengen immer doppelt so gross seien als die vorigen. Wertheim fand zwar den ersten Satz bestätigt, fand aber, dass in derselben Röhre die Steighöhen bei manchen Flüssigkeiten kleiner, bei manchen auch grösser waren, als sie nach dem zweiten Satze hätten sein sollen, und dass bei verschiedenen Röhren die gehobenen Flüssigkeitsvolumina auch mit den Durchmessern der Röhren variirten. Wertheim meinte danach wenigstens eine verschiedene Dicke der an den Wänden der festen Körper haftenden, molecular veränderten Flüssigkeitsschichten bei verschiedenen Flüssigkeiten und bei verschiedenen Krümmungen der Röhren annehmen zu müssen. E. Desains[1]) aber glaubte auch nach Wertheim noch eine vollkommene Constanz des Verhältnisses der gehobenen Volumina bei ebenen Platten und in Röhren annehmen zu können und schrieb die abweichenden Resultate Wertheim's einer unvollkommenen Benetzung der Oberflächen in den betreffenden Versuchen zu. Wilhelmy dagegen bestätigte im Jahre 1863 durch neue sorgfältige Experimente von abweichender Einrichtung wieder die Angaben Wertheim's[2]). Lässt man einen einfachen, regelmässig gestalteten Körper, z. B. eine rechteckige Platte oder einen Cylinder, dessen Gewicht in der Luft $P$ ist, in eine Flüssigkeit nur bis zu einer bestimmten Tiefe tauchen und bestimmt dann in dieser Lage sein Gewicht $\Pi$, wie auch das Gewicht des verdrängten Wassers $V$ und das des capillar an ihm gehobenen Flüssigkeitsvolumens $A$, so wird $\Pi = P - V + A$ sein. Setzt man hierin wieder $A$ gleich dem Product aus der Länge $\lambda$ der Berührungslinie (zwischen der Flüssigkeit und dem Körper) und dem Gewicht $\alpha$ der pro Längeneinheit der Berührungslinie gehobenen Flüssigkeitsmenge, sowie $V$ gleich dem Product aus dem specifischen Gewicht der Flüssigkeit $s$ und dem eingetauchten Volumen des Körpers $v$, so wird $\Pi = P - vs + \alpha\lambda$, und daraus lässt sich die Capillarconstante $\alpha = \frac{\Pi - P + vs}{\lambda}$

[1]) Compt. rend. XLV, p. 225, 1857.

[2]) Ueber die Abhängigkeit der Capillarconstanten des Alkohols von Substanz und Gestalt der benetzten Körper, Pogg. Ann. CXIX, S. 177, 1863. Ueber die Abhängigkeit der Capillaritätscoëfficienten der Flüssigkeiten von ihrer Zusammensetzung, Pogg. Ann. CXXI, S. 44, 1864. Ueber die Abhängigkeit der Capillaritätscoëfficienten der Flüssigkeiten von der chemischen Beschaffenheit und der Gestalt der festen Wand, Pogg. Ann. CXXII, S. 1, 1864. Wilhelmy versprach in der letzten Abhandlung die Fortsetzung seiner Arbeiten, starb aber, bevor er dieselben vollenden konnte.

leicht berechnen. Wilhelmy bemerkte aber, wie Wertheim, dass die so berechnete Constante keine wirklich eine Flüssigkeit charakterisirende Constante sei, sondern vielmehr mit der Gestalt und der Substanz des eingetauchten Körpers sich verändere. Es liess sich annehmen, dass diese Veränderungen herrührten von dem Haften einer Flüssigkeitsschicht an der Oberfläche des eingetauchten Körpers und vielleicht von einer Verdichtung der Flüssigkeit an derselben, so dass dieser Theil der Flüssigkeit nicht mehr als verdrängt dem Auftrieb des Körpers zugezählt werden dürfte. Die vorher gegebene Formel wird dann in die folgende $\Pi = P - vs + O\beta + \alpha\lambda$ umzuändern sein, wo nun $O$ die eingetauchte Oberfläche und $\beta$ den auf der Flächeneinheit verdichteten Theil der Flüssigkeit oder den Verdichtungscoëfficienten bezeichnen. Lässt man dann einen und denselben Körper in derselben Flüssigkeit mehreremal bis zu verschiedenen Tiefen eintauchen, so kann man aus den hierfür erhaltenen verschiedenen Gleichungen das Glied $\alpha\lambda$ eliminiren und danach $\beta$ wie schliesslich $\alpha$ berechnen. Für glatte, ebene Platten, die in Alkohol eintauchten, erhielt Wilhelmy so die folgenden Werthe:

Molecularmechanik, c. 1860 bis c. 1880.

| | | | |
|---|---|---|---|
| | bei Glas . . . | $\beta = 0{,}0\,125\,932$ | $\alpha = 2{,}3250$ |
| | bei Silber . . | $\beta = 0{,}0\,151\,214$ | $\alpha = 2{,}4444$ |
| | bei Messing . | $\beta = 0{,}0\,232\,646$ | $\alpha = 2{,}4476$ |
| | bei Zink . . . | $\beta = 0{,}007\,089$ | $\alpha = 2{,}3263$ |
| und | bei Aluminium | $\beta = 0{,}0\,071\,589$ | $\alpha = 2{,}3065$ [1]), |

womit die Verschiedenheit der Verdichtungscoëfficienten für verschiedene feste Substanzen nachgewiesen war. Ebenso fand Wilhelmy auch eine Verschiedenheit der Verdichtungscoëfficienten bei denselben Stoffen, wenn nur die Krümmung der Oberflächen der festen Körper eine verschiedene war. Merkwürdigerweise aber blieben auch nach der Einführung des Verdichtungscoëfficienten in die Formeln immer noch wie früher bei Wertheim, wenn auch in geringerem Grade, die Abweichungen der Capillarconstanten $\alpha$ übrig. Wertheim hatte als Grund für die von ihm beobachteten Abweichungen eine verschiedene Dicke der an dem festen Körper verdichteten Flüssigkeitsschichten je nach der Krümmung der Oberfläche angegeben. Wilhelmy fand als Ursache der auch von ihm noch bemerkten Abweichungen eine von den verdichteten Schichten abhängige und damit veränderliche Grösse des sogenannten Randwinkels. Bis dahin hatte man den Randwinkel bei benetzenden Flüssigkeiten immer zu 0° oder zu 180° angenommen. Wilhelmy macht dagegen darauf aufmerksam, dass nach den neuen Erfahrungen die Flüssigkeiten nicht mehr direct an dem festen Körper, sondern an einer Flüssigkeitsschicht steigen, deren Verdichtung mit der Oberfläche sich ändert, und dass mit dem Grade

[1]) Pogg. Ann. CXIX, S. 194.

Molecular-Mechanik, c. 1860 bis c. 1880.

dieser Verdichtung auch der Randwinkel sich ändern muss [1]). An Wilhelmy, vor Allem in Betreff des letzteren Punktes, schloss sich später Quincke an, der schon länger die Veränderlichkeit der Capillaritätsconstanten bei seinen vielen Messungen dieser Grössen bemerkt, aber zuerst eine andere Erklärung dafür gegeben hatte [2]). Er sagt im Jahre 1877 [3]) über die Abweichung des Randwinkels von 0 oder 180⁰ bei benetzenden Flüssigkeiten: „Der Randwinkel wässeriger Salzlösungen gegen Glas schwankt zwischen 20 und 30⁰, während man bisher gewöhnt war, diese Salzlösungen als Glas benetzende Flüssigkeiten aufzufassen und den Randwinkel gleich 0⁰ anzunehmen, somit den Werth der Capillarconstante etwa 10 Proc. zu klein angenommen hat“ [4]). In dieser Abhandlung untersucht Quincke auch die schon von G. Hagen und Wilhelmy erwähnte Aenderung der Capillarconstanten mit der Zeit. „Sehr merkwürdig, so drückt er sich aus, sind die Aenderungen, welche nach der Entstehung der freien Oberfläche der Flüssigkeiten allmälig auftreten und längere Zeit fortdauern, so dass ich sie mit der von Wilhelm Weber als elastische Nachwirkung bei festen Körpern bezeichneten Erscheinung vergleichen möchte. Dieselben zeigen eine erst schnelle, dann immer langsamere Abnahme der Cohäsion oder Oberflächenspannung. Die Abnahme beträgt bei einfachen Flüssigkeiten, wie reinem Wasser oder reinem Alkohol, nur wenig Procente des ursprünglichen Maximalwerthes und wird durch Zusatz von geringen Mengen Salz oder Säure sehr erheblich gesteigert“ [5]). Nachdem Quincke mannigfache Annahmen zur Erklärung dieser Erscheinung besprochen, kommt er zu dem Schluss, dass es am einfachsten sei, dieselbe wirklich als ganz entsprechend der elastischen Nachwirkung der festen Körper aufzufassen, und fährt danach fort: „Aehnlich wie die elastische Gleichgewichtslage der Theilchen eines festen Körpers erst allmälig oder nach unendlich langer Zeit eintritt, würde auch die Gleichgewichtslage der Grenztheilchen einer Flüssigkeit erst allmälig eintreten. Es ist eine gewisse Zeit nöthig, damit die Aenderung der Molecularbeschaffenheit einen stationären Zustand erreicht, welche die Theilchen einer Flüssigkeit an der Grenzfläche gegen Luft oder andere Flüssigkeiten zeigen, und welche durch gleichzeitige Aenderung der Temperatur, der elektromotorischen Kraft und andere Eigenschaften nachgewiesen

---

[1]) Für das Dasein einer an Dichtigkeit abweichenden und in der Dicke veränderlichen Grenzschicht einer Flüssigkeit an der Oberfläche eines festen Körpers sprach sich 1871 A. Mousson wieder sehr bestimmt aus. (Vierteljahrsschrift der naturf. Gesellsch. in Zürich XV, S. 305, 1871; Klein, Revue der Fortschritte d. Naturw. II, S. 3.)

[2]) Pogg. Ann. CXXXIX, S. 89, 1870. — G. Quincke, geb. am 19. Nov. 1834, Prof. d. Physik in Heidelberg.

[3]) Ibid. CLX, S. 337 und 560, 1877.

[4]) Ibid., S. 339.

[5]) Ibid., S. 340.

werden kann. Die tropfbaren Flüssigkeiten würden auch in dieser Beziehung ähnliche Eigenschaften wie die sogenannten festen Körper haben" [1]).

Molecular-Mechanik. c. 1860 bis c. 1880.

Den oben gegebenen Satz über die Grösse des Randwinkels ergänzt Quincke in einer gleich darauf folgenden Arbeit über die Ausbreitung von Flüssigkeiten auf festen Körpern [2]) durch die folgenden Sätze: „Der Randwinkel der freien Oberfläche verschiedener Flüssigkeiten, wie Wasser, Alkohol u. s. w., und wässeriger oder alkoholischer Salzlösungen gegen reine Glas-, Krystall- oder Metallflächen erscheint $0^0$. Die Flüssigkeiten breiten sich auf der reinen festen Oberfläche aus. Hat der Randwinkel wie gewöhnlich grössere Werthe, so ist die feste Oberfläche mit einer (unmerklich) dünnen Schicht fremder Substanz überzogen, mit deren Dicke sich der Randwinkel ändert. Die Dicke dieser dünnen Schicht darf jedoch einen bestimmten Maximalwerth nicht übersteigen, der ebenso gross oder grösser als der Radius der Wirkungssphäre der Molecularkräfte ist. Diese dünne, an der Oberfläche des festen Körpers adhärirende Schicht kann aus fester, flüssiger oder gasförmiger Substanz bestehen. Sie kann aus der aufgebrachten Flüssigkeit selbst bestehen und lässt sich ausser durch den Randwinkel auch noch durch das sogenannte Kriechen der Salze oder die Elektricitätsleitung an der Oberfläche des festen Körpers, in einzelnen Fällen auch durch die Interferenzfarben des von ihr reflectirten Lichtes nachweisen. Die unmerklich dünnen Schichten derselben Flüssigkeit haben je nach der Dauer und der Art ihrer Entstehung, oder je nach der Natur des festen Körpers, an dem sie adhäriren, verschiedene Eigenschaften. Schnell entstandene Wassertropfen breiten sich auf frisch gereinigten Glasflächen leichter aus, als langsam entstandene. Diese unmerklich dünnen Schichten fremder Substanz scheinen auch den Grund für die Abweichungen von Theorie und Erfahrung bei der Bestimmung der Oberflächenspannung an der gemeinsamen Grenze von Flüssigkeit und festen Körpern abzugeben. Ist der Randwinkel $0^0$ oder unmöglich, so erfolgt eine Ausbreitung der Flüssigkeit an der Oberfläche des festen Körpers. Bei Flüssigkeiten, die in jedem Verhältniss mischbar sind, verdrängt die Flüssigkeit mit kleinerer Oberflächenspannung die mit grösserer Oberflächenspannung. Diese Oberflächenspannung und die möglicher Weise eintretende Verdrängung ändern sich aber mit der Natur der festen Substanz. Dies ergänzt die Brücke'sche Theorie der Oberflächendiffusion längs einer festen Wand. Die Gegenwart anderer Flüssigkeiten und besonders von Luft kann die Ausbreitung einer Flüssigkeit an einer festen Wand wesentlich modificiren. Die Abhängigkeit des Randwinkels von der Dicke der unmerklich dünnen Schicht auf der festen Oberfläche erklärt die Hauchbilder von Moser und Waidele mit Wasserdampf, die Lichtbilder von Daguerre mit

[1]) Pogg. Ann. CLX, S. 584.
[2]) Wiedem. Ann. II, S. 145, 1877.

Molecular-Mechanik, c. 1860 bis c. 1880.

Quecksilberdampf, die elektrischen Hauchbilder von G. Karsten und Riess mit Wasser-, Quecksilber- und Joddampf“ [1]).

War man bei der Behandlung der Capillaritätserscheinungen ganz in den Wegen der dynamischen Physik geblieben [2]) und hatte man selbst bei der Ausbreitung der Flüssigkeiten nur an abstossende Kräfte, nicht an abstossende Bewegungen gedacht, so begannen doch bei der Behandlung der Diffusion der Flüssigkeiten Spuren kinetischer Analogien wenigstens sich zu zeigen. Noch bevor die kinetische Theorie der Gase entwickelt und danach eine kinetische Theorie der Gasdiffusion ermöglicht war, hatte A. Fick [3]) durch sorgfältige Untersuchungen gefunden, dass die freie Diffusion von Salzlösungen ganz nach den Gesetzen der Verbreitung der Wärme in festen Körpern geschehe. Ganz entsprechend dem Fourier'schen Gesetze der inneren Wärmeleitung in festen Körpern, stellte er für die freie Diffusion der Salze den Satz auf, nach dem die Salzmenge, welche bei der Hydrodiffusion in der Richtung der abnehmenden Concentration durch

---

[1]) Quincke's hier erwähnte Abhandlung erscheint als eine Fortsetzung und Revision einer grösseren Arbeit vom Jahre 1870: „Ueber Capillaritätserscheinungen an der gemeinschaftlichen Oberfläche zweier Flüssigkeiten“ (Pogg. Ann. CXXXIX, S. 1). Der vielen anderen um diese Zeit erscheinenden Arbeiten über die Grösse und Eigenschaften der Oberflächenspannung können wir hier nicht weiter gedenken. Nur eine Arbeit von Fr. Melde (Experimentaluntersuchungen über Blasenbildung in kreisförmig cylindrischen Röhren, Marburg 1868 und 1870), welche Luftblasen in Wasser, Alkohol u. s. w., sowie Quecksilbertropfen auf ebener Grundlage und in engen Röhren behandelt, heben wir besonders hervor, weil sie die Erscheinungen der Oberflächenspannung wieder von neuer Seite zeigte.

[2]) Nur Kant hatte in seinem nachgelassenen Werke „Vom Uebergange von den metaphys. Anfangsgründen d. Naturw. zur Physik“ schon die Capillarität kinetisch erklärt. „Das Wasser, heisst es dort, wird in der gläsernen Röhre durch Berührung mit dem Glase noch flüssiger (und damit specifisch leichter) vermittelst der Erschütterung des Aethers, wie alle Erschütterungen mit vergrösserter Ausdehnung dem Volumen nach verbunden ... sind. Diese Erschütterung des auf der Oberfläche zur Zusammenziehung in Globosität bestrebenden Wasserhäutchens schwächt diese seine Anziehung unter den Theilen des Wassers selbst und vergrössert seine Berührung mit dem leeren Raume durch die Berührung mit dem Glase, dessen Erschütterung grösser als die des Wasserhäutchens ist.“ (Altpr. Monatsschr. XX, S. 354; Krause, das nachgelassene Werk Imm. Kant's, S. 186.) Auch die Thatsache, dass das Wasser in Capillarröhren in einer an dem Glase haftenden Flüssigkeitsröhre steigt, betont Kant in diesem Werke: „Allein abgesehen von der Kühnheit der Hypothese, eine solche in die Ferne anziehende Kraft, die einem Gewichte gleich ist, anzunehmen, kann durch sie dennoch die Wassersäule im Haarröhrchen, nicht aber das Wassergas gehoben werden. Denn wenn das Innere der Glasröhre nur einmal (durch Saugen) innerhalb hoch genug benetzt worden ist, so hängt das Wasser nicht mehr am trockenen, oberwärts abstehenden Glasringe, sondern am Wasser in der Röhre, wodurch diese benetzt worden.“ (Altpr. Monatsschr. XX, S. 424; Krause, Kantwerk, S. 187.)

[3]) Pogg. Ann. XCIV, S. 59, 1855. — A. Fick, geb. am 3. Sept. 1829 in Cassel, Prof. in d. med. Fac. zu Würzburg.

ein beliebiges Flächenelement in einer gewissen Zeit hindurchfliesst, proportional sein muss der Grösse des betrachteten Flächenelementes, der Länge der Zeit, dem Werthe der Concentrations-Abnahme am Orte des Flächenelementes nach der Richtung der Strömung, und endlich proportional der Diffusionsconstanten $k$, deren Werth von der Natur der Salzlösung abhängt. Fick's Messungen wurden seiner Zeit mannigfach angefochten, spätere Untersuchungen jedoch waren seinem Gesetz günstig. Johannisjanz fand im Jahre 1877 bei Untersuchung der Diffusion von Kochsalzlösungen und Wasser, dass dieselbe im Allgemeinen dem Fick'schen Diffusionsgesetze entspreche, wenn auch die einzelnen erhaltenen Werthe der Diffusionsconstanten in ziemlich weiten Grenzen um den Mittelwerth schwankten [1]. Auch H. F. Weber's Versuche von 1878 [2]) bestätigten das Fick'sche Elementargesetz der Diffusion, und nur in einem Punkte bedürfte dasselbe nach diesen Versuchen einer kleinen Correction, die aber für das Fourier'sche Gesetz in gleicher Weise nöthig ist. Die Grösse der Diffusion der Salzlösungen nimmt nämlich mit der Concentration allmälig ab, gerade wie die innere Wärmeleitung mit wachsender Temperatur langsam sich vermindert, während nach jenem Gesetze die beiden Grössen constant bleiben müssten. War schon durch diese Analogie auf die Auffassung der Hydrodiffusion ebenso wie die der Gasdiffusion als eine Folge von inneren Bewegungen hingedeutet, so kamen dazu noch andere Umstände, die eine Abhängigkeit dieser Erscheinungen von Molecularbewegungen weiter ahnen liessen. J. Schuhmeister bestätigte [3]), was H. F. Weber auch in der obigen Arbeit bemerkte, dass die Diffusion mit steigender Temperatur wächst, ausserdem constatirte er, dass dieselbe mit dem Coëfficienten der inneren Reibung und vielleicht auch mit der Grösse des galvanischen Leitungsvermögens der betreffenden Flüssigkeiten parallel läuft. Endlich aber, und das ist wohl das Wichtigste, constatirte man, dass für das Eintreten von Diffusionsbewegungen Berührungen verschiedener Flüssigkeiten mit ihren Adhäsions- und verschiedenen Cohäsionskräften gar nicht nöthig sind, sondern dass dieselben auch bei verschiedenen Zuständen der Theile einer Flüssigkeit, z. B. verschiedenen Temperaturen derselben, auftreten. „**Da die Diffusion auch noch eintritt, wenn die Flüssigkeiten nur minimale Differenzen zeigen, so schliesst man**, wie O. Lehmann sagt [4]), **dass sie auch noch**

Molecular-Mechanik, c. 1860 bis c. 1880.

---

[1]) Wiedem. Ann. II, S. 24, 1877.

[2]) Vierteljahrsschr. d. naturf. Gesellsch. in Zürich XXIII, S. 325, 1878.

[3]) Wiener Sitzungsber. LXXIX, S. 603, 1879. Nach Schuhmeister gilt aber die Weber'sche Angabe, dass die Diffusionsconstante mit der Concentration abnimmt, nicht allgemein, vielmehr scheint in den meisten Fällen das Gegentheil der Fall zu sein.

[4]) O. Lehmann, Molecularphysik I, S. 264, Leipzig 1888. Leider war unsere Arbeit beim Erscheinen dieses Werkes schon zu weit vorgeschritten,

Molecular-Mechanik, c. 1860 bis c. 1880.

möglich ist, wenn die Unterschiede völlig fehlen, d. h. wenn es sich nur um Theile derselben Flüssigkeit handelt. In jeder Flüssigkeit müssen also fortwährend innere Strömungen existiren, die sich unserer Wahrnehmung entziehen."

Eine Zeit lang glaubte man auch die freien Bewegungen in dem Inneren der Flüssigkeiten oder gar die Bewegung der Molecüle derselben direct beobachtet zu haben. Der berühmte Botaniker Rob. Brown hatte im Jahre 1827 [1]) durch ein stark vergrösserndes Mikroskop in Wasser, in welchem feine Stäubchen eines festen Körpers suspendirt waren, eigenthümliche, sehr unregelmässige, zitternde Bewegungen bemerkt, die man seitdem viel beobachtet und als die Brown'schen Molecularbewegungen beschrieben hat. Muncke [2]) bezeichnete gleich darauf die durch die Flüssigkeit gehenden Licht- und Wärmestrahlen als die Ursachen der Bewegungen. Wiener aber verwarf im Jahre 1863 [3]) alle Erklärungen, welche die Ursachen der Erscheinungen ausserhalb der Flüssigkeiten suchten. Nach ihm besteht die Eigenthümlichkeit der Flüssigkeiten darin, dass ihre Molecüle Schwingungen ausführen, die mit denen der in ihnen enthaltenen Aetheratome gleichgerichtet sind, und diese sonst unsichtbaren Molecularschwingungen sind es, welche die sichtbaren Bewegungen der suspendirten Theilchen hervorrufen. Alle nachfolgenden Arbeiten von Exner, van der Mensbrugghe [4]) u. A. jedoch widersprachen in ihren Resultaten wieder dieser Erklärung und führten als Ursache der sogenannten Molecularbewegungen auf Ströme in den Flüssigkeiten, die jedenfalls nicht direct mit den Molecularbewegungen der Flüssigkeiten identisch sind. Ein ähnliches Ergebniss hatten auch die Untersuchungen der merkwürdig kreiselnden Bewegungen, die sich an der Berührungsfläche zweier Flüssigkeiten, an der Oberfläche von Luftblasen, an kleinen Campherstückchen, die auf Wasser schwimmen u. s. w., zeigen, und die Dutrochet 1841 [5]) und E. H. Weber 1855 [6]) zuerst genauer untersucht haben. Ja, hier wurde durch die Arbeiten van der Mensbrugghe's [7]), Tomlinson's u. A. ziemlich sichergestellt, dass dieselben

---

als dass wir dasselbe, so wie wir gewünscht, hätten berücksichtigen können. — O. Lehmann, Prof. am Polytechnicum in Carlsruhe.

[1]) Pogg. Ann. XIV, S. 294, 1828.

[2]) Ibid. XVII, S. 160, 1829.

[3]) Ibid. CXVIII, S. 79, 1863. — Ludw. Christ. Wiener, geboren am 7. December 1826 in Darmstadt, Prof. am Polytechnicum in Carlsruhe.

[4]) Ibid. CXXXVIII, S. 323, 1869; CXLVI, S. 623, 1872.

[5]) Compt. rend. XII, p. 2, 29, 126 und 598, 1841: S. l. cause des mouvements que présente le camphre placé à la surface de l'eau.

[6]) Pogg. Ann. XCIV, p. 447, 1855: Mikroskop. Beob. sehr gesetzmässiger Bewegungen, welche die Bildung von Niederschlägen harziger Körper aus Weingeist begleiten.

[7]) Pogg. Ann. CXLVI, S. 623.

auf Erscheinungen der Ausbreitung der Flüssigkeiten auf einander, der Verdampfung, wie auch der Diffusion der Flüssigkeiten zurückzuführen sind[1]).

Molecular-Mechanik, c. 1860 bis c. 1880.

Stärker übrigens als in den mehr statischen Erscheinungen traten die Wirkungen von inneren Bewegungen der Flüssigkeiten in den Bewegungserscheinungen derselben hervor, vor Allem dadurch, dass immer deutlicher bei allen Bewegungen der Flüssigkeiten innere Widerstände sich zeigten, deren Auftreten und deren Uebertragung auf eine innere Reibung der Flüssigkeiten hinwies, die in ihren Gesetzen der inneren Reibung der Gase ganz analog war. Schon bei der Messung der Strömungsgeschwindigkeiten in Flüssen und offenen Canälen stellte sich heraus, dass diese Geschwindigkeiten ebenso sehr als von den Fallhöhen der Gewässer auch von den Widerständen an den Wänden der Strombetten abhängig sind, dass dadurch die Geschwindigkeiten auch in den einzelnen Punkten eines Querprofils des Stromes sehr verschiedene werden und dass die Bestimmung der stattfindenden Vertheilung dieser Geschwindigkeiten zu einer recht complicirten Aufgabe sich gestaltet. Sehr zahlreiche und sorgfältige Messungen der Geschwindigkeiten in einem Strome stellten während der Jahre 1851 bis 1861 A. A. Humphreys und L. H. Abbot im Auftrage des amerikanischen Congresses am Mississippi an[2]). Sie bestätigten dadurch den schon mehrfach ausgesprochenen Satz, dass die Geschwindigkeiten aller Punkte in einer senkrechten Tiefenlinie zur Intensitätscurve eine Parabel haben und dass die grösste Geschwindigkeit nicht an der Oberfläche, sondern ziemlich weit unter derselben (beim Mississippi in 0,317 der Flusstiefe) liegt. Aus ihren Messungen, wie aus älteren Versuchen am Oberrhein, an der Seine, am Canal von Bourgogne u. a.

[1]) Vergl. auch O. Lehmann, Molecularphysik I, S. 264 u. f., Leipzig 1888. Die Strömungen, welche durch Temperaturveränderungen oder auch durch äussere Rotationen im Inneren oder an der Oberfläche von Flüssigkeiten hervorgerufen werden, hat Wilh. v. Bezold (geb. 1835, Prof. der Meteorologie in Berlin) in interessanter Weise untersucht und sichtbar gemacht, dadurch dass er Tropfen gefärbter hektographischer Tinte auf und in die Flüssigkeiten brachte (Wiedem. Ann. XXIV, S. 27 und 569, 1885; XXXII, S. 171, 1887). O. Reynolds (Nature XXX, p. 88, 1884) macht die inneren Bewegungen der Flüssigkeiten dadurch sichtbar, dass er Farben streifenartig in dieselben einführt. Er leitet da auch die Nichtübereinstimmung, welche in vielen Fällen zwischen den Resultaten der theoretischen und der experimentellen Hydrodynamik herrscht, aus dem Vorhandensein von inneren Bewegungen ab, die die theoretische Hydrodynamik nicht berücksichtigt. Ja er betont, dass auch die Bewegungsgesetze fester Körper durch innere Bewegungen abgeändert werden können und dass z. B. eine an einem Faden hängende Hohlkugel, in deren Innerem ein schweres Rad unsichtbar rotirt, sich ganz anders verhalten muss, als eine äusserlich ganz gleich erscheinende massive Kugel.

[2]) Theorie und Bewegung des Wassers in Flüssen und Canälen nach dem Berichte Humphreys-Abbot's von Grebenau, München 1867. (Humphreys-Abbot's Report upon the Physics and Hydraulics of the Mississippi River erschien 1861.)

Molecular-Mechanik, c. 1860 bis c. 1880.

abstrahirte G. Hagen[1]) für die mittlere Geschwindigkeit $v$ eines Stromes die Formel $v = 2{,}425 \sqrt{t} \sqrt[6]{\alpha}$ Meter, wo $\alpha$ das relative Gefälle und $t$ den Flächeninhalt des Querprofils, dividirt durch den benetzten Umfang, bedeutet. Dabei aber ergab sich, dass die einzelnen Geschwindigkeiten im Strombett von einem Reibungswiderstande nicht bloss an den Wänden, sondern auch an der Oberfläche und ausserdem von Unregelmässigkeiten des Strombettes, Erweiterungen und Verengerungen, sowie von Richtungsveränderungen desselben etc. so stark abhängen, dass die mittlere Geschwindigkeit in Wirklichkeit doch nur durch exacte Beobachtung vieler Einzelgeschwindigkeiten festgestellt werden kann. Dem entsprechend fand P. Graeve[2]) bei Messungen, welche er 1877 im amtlichen Auftrage in der Oder und der Warthe anstellte, dass die Verhältnisse der Geschwindigkeiten der Wassertheilchen in einzelnen Verticallinien, wie in ganzen Querprofilen und Profilabschnitten sehr veränderliche sind, dass für die Geschwindigkeitsabnahmen in den Verticallinien vom Wasserspiegel bis zum Boden der Gewässer kein allgemeines Gesetz zu ermitteln und dass es sonach auch unmöglich ist, aus Geschwindigkeitsermittelungen in den oberen Wasserschichten auch nur mit annähernder Sicherheit auf die Sohlen- und die mittlere Geschwindigkeit zu schliessen.

Die Verschiedenheiten der Geschwindigkeiten unter den Theilen der strömenden Gewässer führen vor Allem auf zwei Arten von Ursachen zurück, erstens auf Veränderungen in der Bewegungsrichtung der einzelnen Theilchen, die durch Veränderungen des Stromprofils, Erweiterungen und Verengerungen des Flussbettes, Abweichungen von der geraden Linie u. s. w. bedingt, und zweitens auf directe Verminderungen der Geschwindigkeit, die durch die Reibungen an den festen Umgebungen der fliessenden Gewässer bewirkt werden. Mit der Ermittelung der Wirkung der ersteren Ursachen beschäftigte sich in intensiver und erfolgreicher Weise J. Weisbach[3]), der 1855 in

---

[1]) Ueber die Bewegung des Wassers in Strömen, Abhandl. der Berliner Akademie 1868.

[2]) Civilingenieur XXV, S. 173, 1879; Revue der Fortschritte d. Naturw. v. Klein, IX, S. 28, 1881.

[3]) Julius Weisbach (1806—1871), Prof. a. d. Bergakademie in Freiberg. In dem oben genannten Werke behandelte Weisbach ausführlich auch die Ausflusserscheinungen und beschrieb den nach ihm benannten Ausflussapparat, den er aber auch schon 1848 im Polytechn. Centralblatte bekannt gegeben hatte. Auf die Gesetze der Springbrunnen kam er in einer sehr interessanten Abhandlung im Jahre 1861 (Dingler's Journ. CLXI, S. 402) zurück. Als Relation zwischen der Druckhöhe $h$ und der Steighöhe $s$ hatte Mariotte $\frac{h}{s} = 1 + \frac{s}{300}$ (Par. Fuss), und D'Aubuisson $\frac{s}{h} = 1 - 0{,}1\, h$ (Meter) gegeben, welche Formeln aber nur für kleine Druckhöhen anwendbar sind. Weisbach nahm dafür $s = \frac{h}{\alpha + \beta h + \gamma h^2}$ und fand durch Beobachtungen, bei denen

einem Hauptwerke: „Die Experimentalhydraulik, eine Anleitung zur Ausführung hydraulischer Versuche im Kleinen" (Freiburg 1855) die Resultate seiner seit längeren Jahren betriebenen Untersuchungen zusammenfasste. Theoretisch wichtiger aber wurde die Behandlung der zweiten Art von Ursachen; denn sie führte direct zu einer tieferen Auffassung von dem Wesen der Flüssigkeiten. Früher hatte man das Wesen der Flüssigkeit und ihre unterscheidenden Merkmale von anderen Aggregatzuständen darin gefunden, dass zwei Theilchen derselben zwar in der Richtung ihrer Verbindungslinie noch eine gewisse Anziehung, die Cohäsion, auf einander ausübten, in der Richtung senkrecht zu dieser Linie aber mit absoluter Leichtigkeit an einander verschiebbar seien. Nach dieser Vorstellung war zwar durch die Adhäsion eine äussere Reibung der Flüssigkeiten an den Wänden der Canäle möglich, die Wirkungen derselben aber konnten streng genommen auch nicht weiter als diese Adhäsion reichen. Die beobachtete Uebertragung der Hemmungen von den Wänden auf das ganze Innere der Flüssigkeiten zeigte nun, dass die angenommene absolute Verschiebbarkeit der Theilchen in denselben nicht statthaben könne und dass vielmehr eine der Verschiebung widerstehende Kraft existiren müsse, durch welche bei einer verschieden schnellen Bewegung zweier an einander grenzenden Schichten die schnellere verlangsamt und die langsamere beschleunigt würde. Jene Kraft, welche diese Erscheinungen einer inneren Reibung der Flüssigkeiten verursachte, bezeichnete man dann als die Zähigkeit oder die Viscosität der Flüssigkeiten. Wollte man diese Viscosität durch die Widerstände messen, welche dieselbe beim Fliessen erzeugte, so benutzte man dabei der Gleichmässigkeit der Wirkungen wegen am besten geschlossene Röhren und zwar, um Störungen der Erscheinungen durch Richtungsveränderungen und Stösse der Theilchen so viel als möglich auszuschliessen, Capillarröhren. Untersuchungen solcher Art über die Bewegung des Wassers in engen cylindrischen Röhren hatte Hagen schon im Jahre 1839 [1]) angestellt. Sehr umfassende, sorgfältige Messungen der Geschwindigkeiten der Flüssigkeiten in Capillarröhren führte dann auch Poiseuille während der Jahre 1840 bis 1847 [2]) aus. Er fand für die Volumina der Flüssigkeiten, welche in

Molecular-Mechanik, c. 1860 bis c. 1880.

---

die Sprunghöhe mit dem Theodolithen und zugleich der Druck mit dem Manometer gemessen wurden, bei einer kreisförmigen Ausflussöffnung von 7,1 mm Durchmesser $s = \frac{h}{1 + 0{,}010348\,h + 0{,}0011851\,h^2}$. Mit der Grösse der Ausflussöffnung wuchs auch die Sprunghöhe.

[1]) Pogg. Ann. XLVI, S. 423, 1839.

[2]) Recherches exp. s. le mouv. des liquides dans les tubes de très-petites diamètres. Mém. Sav. étrang. IX, p. 433, 1846, im Auszuge schon Ann. de chim. et de phys. (3) VII, p. 50, 1843, auch Pogg. Ann. LVIII, S. 424, 1843. S. le mouv. des liquides de nature différente dans les tubes de très-pet. diam., Ann. de chim. et de phys. (3) XXI, p. 76, 1847. In den Compt. rend. gab Poiseuille Nachrichten von seinen Ver-

Molecular-Mechanik, c. 1860 bis c. 1880.

einer bestimmten Zeit durch eine Capillarröhre hindurchgingen, die Formel $Q = k \cdot \frac{H D^4}{L}$, wo $H$ die Druckhöhe, $D$ den Durchmesser, $L$ die Länge der Röhre und $k$ einen Coëfficienten bedeuteten, der von der Natur der Flüssigkeiten, wie auch von der Temperatur abhängt. Mit den sechziger Jahren nun concentrirte sich das Interesse hauptsächlich auf die Bestimmung dieses Coëfficienten, den man direct als die Constante der inneren Reibung bezeichnete und dessen Grösse für die verschiedenen Flüssigkeiten man zu bestimmen sich bemühte. E. Hagenbach, der im Jahre 1860 [1]) zu einer der Poiseuille'schen ganz entsprechenden Formel gelangte, definirte dabei die Viscosität (oder die Reibungsconstante) einer Flüssigkeit direct als die Kraft, welche nöthig ist, um eine Flüssigkeitsschicht von der Dicke eines Molecüls und der Einheit der Oberfläche mit der Einheit der Geschwindigkeit an einer anderen Schicht um die Entfernung zweier Molecüle zu verschieben. Dabei setzte er die Reibung proportional der reibenden Oberfläche und der relativen Geschwindigkeit der reibenden Schichten [2]), fand aber dieselbe überraschender Weise unabhängig vom Druck und constatirte eine bedeutende Abnahme derselben mit der Temperatur. Im Uebrigen erwies sich auch bei ihm die Reibung nur abhängig von der Natur der Flüssigkeiten, nicht aber von der Beschaffenheit der Röhrenwände; die Reibung innerhalb der Flüssigkeiten musste also die äussere Reibung zwischen Flüssigkeit und Wand ganz unverhältnissmässig überwiegen, und dies wieder war nur erklärlich durch ein vollständiges Haften der nächsten Flüssigkeitsschicht an den Röhrenwänden, so dass die Reibung nicht

---

suchen schon seit 1840 (Compt. XI, p. 961 u. 1041, 1840; XII, p. 112). — Jean Léon Poiseuille, geboren am 22. April 1799 in Paris, praktischer Arzt daselbst.

[1]) Bestimmung der Zähigkeit einer Flüssigkeit durch den Ausfluss aus Röhren, Pogg. Ann. CIX, S. 385, 1860.

[2]) Siehe hierfür auch den Abschnitt über Reibung der Gase S. 564. Hagenbach sagt über die Proportionalität der inneren Reibung und der Geschwindigkeit: „Diese Annahme lässt sich zwar dadurch rechtfertigen, dass man sagt, bei doppelter Geschwindigkeit muss ein Theilchen von doppelt so viel anderen losgerissen werden; bewiesen wird aber diese Annahme am besten dadurch, dass man durch ihre Einführung Formeln findet, die mit der Erfahrung übereinstimmen.“ (Pogg. Ann. CIX, S. 392.) Diese Proportionalität der inneren Reibung mit der Geschwindigkeit unterscheidet dieselbe der Art nach von der gleitenden Reibung fester Körper, die von der Geschwindigkeit unabhängig oder sogar bei sehr grossen Geschwindigkeiten sich mit dem Wachsen dieser als abnehmend erwiesen hat. Warburg und v. Babo (Wiedem. Ann. II, S. 406, 1877) schlossen daraus, dass diese äussere Reibung zum grössten Theile nicht von Molecularattractionen und nicht von Gas- oder Flüssigkeitsschichten, die an den Oberflächen condensirt seien, sondern vielmehr von den Unebenheiten der Oberflächen und deren Elasticität herrühren könnte.

zwischen Wand und Flüssigkeit, sondern nur zwischen Flüssigkeit und Flüssigkeit stattfand. Mit diesen Resultaten stimmten principiell die Ergebnisse, welche O. E. Meyer [1]) für die innere Reibung der Flüssigkeiten um dieselbe Zeit wie Hagenbach nach einer anderen Methode erhielt, einer Methode, die er bald darauf auch zur Messung der Reibung der Gase anwendete und die wir schon früher beschrieben haben. Durch die Rotationen einer Scheibe in Wasser fand er für die innere Reibung ähnliche, nur wenig grössere Werthe, wie sie aus Poiseuille's Strömungsversuchen hervorgingen, constatirte, dass die innere Reibung bei Wasser wie bei Salzlösungen kleiner sei als bei Oel, und bestätigte, dass die innere Reibung proportional sei der Oberfläche und der relativen Geschwindigkeit, dass sie mit der Temperatur beträchtlich abnehme und dass auch bei den Bewegungen seiner Scheiben keine äussere Reibung als Hemmung sich wirksam gezeigt habe. Damit blieb natürlich noch immer die Möglichkeit eines Einwirkens der äusseren Reibung in anderen Fällen, und in der That zeigten im Jahre 1860 Versuche [2]), welche G. v. Pietrowski auf Veranlassung von Helmholtz anstellte, dass unter besonderen Umständen wohl auch ein theilweises Gleiten einer Flüssigkeit an einem festen Körper stattfinden könne. Helmholtz entwickelte unter Voraussetzung auch einer äusseren Reibung für die Ausflussmenge bei gläsernen Röhren die Formel $Q = \frac{\pi (p_0 - p_1)}{8 k^2 L} (R^4 + \lambda R^3)$, wo nun $p_0$ den Druck am Anfange, $p_1$ am Ende der Röhre, $R$ den Radius, $L$ die Länge derselben, $k^2$ den Coëfficienten der inneren Reibung und $\lambda$ endlich den Gleitungscoëfficienten [3]), d. i. eine Constante bezeichnet, die von der Natur der Wand und der Flüssigkeit abhängt und der Reibung

Molecular-Mechanik, c. 1860 bis c. 1880.

[1]) Ueber die Reibung der Flüssigkeiten, Pogg. Ann. CXIII, S. 55, 193 und 383 (Experimentelle Resultate) und Crelle's Journal LIX, S. 229 (Mathematische Entwickelungen). Ein grosser Theil von dieser Arbeit Meyer's war schon Ende des Jahres 1857 der Königsberger Facultät aus Veranlassung einer Preisaufgabe derselben eingereicht und von dieser auch am 18. Januar 1858 mit dem doppelten Preise gekrönt worden. Meyer's Vorstellung von der Reibung und dem Reibungscoëfficienten ist schon früher bei der Theorie der Reibung der Gase dargelegt worden. Dadurch, dass Meyer die Reibung der Flüssigkeiten immer mit der Reibung der Gase verglich, erhielt auch die Erklärung der ersteren bei ihm eine mehr kinetische Färbung. Meyer betont bei der inneren Reibung vor Allem die Uebertragung der Bewegung von einer bewegten Schicht auf eine benachbarte ruhende, während Hagenbach mehr direct an die Ursache solcher Uebertragungen, die Viscosität, denkt. Ueber die innere Reibung der Flüssigkeiten beim Strömen in engen Röhren erschien im Jahre 1861 noch eine Abhandlung von H. Jacobsohn unter dem Titel „Zur Einleitung in die Hämodynamik" im Archiv für Anatomie, 1861, S. 304.

[2]) Sitzungsber. d. Wiener Akademie, math.-naturw. Classe, XL, S. 607; Wissenschaftl. Abhandlungen von Helmholtz, I, S. 172.

[3]) Nach O. E. Meyer (kinet. Theorie der Gase, S. 147) ist der Gleitungscoëfficient gleich dem Quotienten aus den Coëfficienten der inneren und der äusseren Reibung.

Molecular-Mechanik, c. 1860 bis c. 1880.

entgegengesetzt ist. Die Versuche wurden so angestellt, dass man ein mit der Flüssigkeit gefülltes, regelmässiges Gefäss, z. B. eine Hohlkugel, um eine seiner Achsen in Rotation versetzte und dann die Abnahmen der Schwingungsweiten beobachtete. Aus diesen Versuchen ergab sich, dass für die Bewegung von Wasser in gläsernen Gefässen mit glatten, gut gereinigten Oberflächen der Gleitungscoëfficient $\lambda$ wohl gleich Null zu setzen ist, dass also die berührende Wasserschicht hier fest an dem Gefässe haftet, dass dies für Alkohol und Aether auch in Metallgefässen mit polirter und vergoldeter Oberfläche noch zutrifft, dass aber Wasser in solchen Gefässen eine sichere, äussere Reibung und somit ein Gleiten an der Oberfläche zeigt. Dieses Thema wurde dann weiter noch einige Mal behandelt. Warburg fand im Jahre 1870 [1]), dass auch bei Flüssigkeiten, welche die Röhrenwände nicht benetzen, wie bei Quecksilber und gläsernen Capillaren, die Ausflussmengen durch die Formel $Q = \frac{\pi (p_0 - p_1)}{8 k^2 L} R^4$ dargestellt werden können und dass also auch hier ein Haften der Flüssigkeiten an den Röhrenwänden angenommen werden muss. W. C. Unwin aber fand im Jahre 1880 [2]) durch Versuche mit Metallscheiben von verschieden rauhen Oberflächen, die in Wasser rotirten, dass die Widerstände von der Beschaffenheit der Oberflächen sehr stark abhängig waren, und kam überhaupt zu Resultaten, die mit den früher erhaltenen sehr wenig übereinstimmten. Zum Theil dürfte das darin seinen Grund haben, dass er mit viel grösseren Geschwindigkeiten als seine Vorgänger experimentirte und dass dabei Nebenwirkungen, wie innere Stösse, auftraten, die Kraftverluste herbeiführten.

Von der Reibung, vor Allem der inneren, müssen natürlich alle Bewegungserscheinungen der Flüssigkeiten beeinflusst werden, und das genaue Studium dieses Einflusses in allen einzelnen Fällen wird für die Hydrodynamik von besonderer Wichtigkeit sein. Da indessen die Beurtheilung des Einflusses der inneren Reibung die Kenntniss der Bewegungsdifferenzen wie ihrer Vertheilung im Inneren der Flüssigkeiten voraussetzt und da diese Bewegungen selbst noch kaum untersucht und jedenfalls kaum bekannt sind, so wird jenes Studium immer ein besonders schwieriges und langwieriges bleiben, und in der That sind auch in der Untersuchung solcher Vorgänge noch wenig weitere Erfolge zu verzeichnen. Paul du Bois-Reymond zwar hatte schon 1854 [3])

---

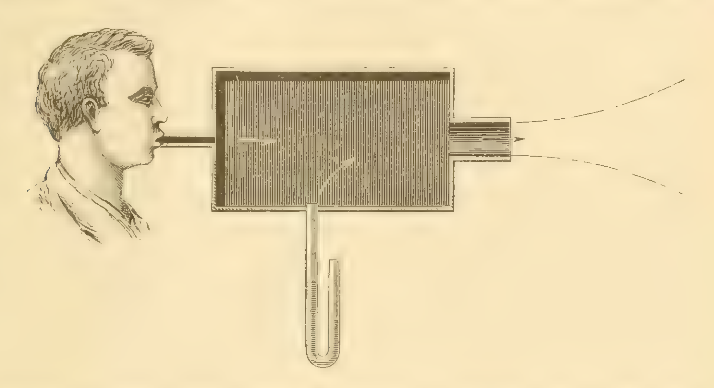
[1]) Pogg. Ann. CXL, S. 367, 1867: Ueber den Ausfluss des Quecksilbers aus gläsernen Capillarröhren. Doch constatirten auch auf der anderen Seite Kundt und Warburg, dass bei Gasen der Coëfficient der Gleitung an einer festen Wand wohl einen etwas von Null verschiedenen Werth haben muss. (Pogg. Ann. CLV, S. 337 und 525; CLIX, S. 399.) — E. Warburg, geb. am 9. März 1846, Prof. d. Physik in Freiburg i. B.

[2]) Proc. of the Roy. Soc. XXXI, p. 54, 1880. — W. C. Unwin, Prof. of Hydrauling Engineering at the Royal Indian Engineering College.

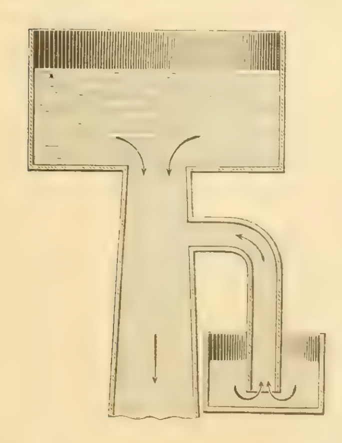
[3]) Unters. über d. Flüssigkeiten, über deren innere Strömungserscheinungen u. s. w., Berlin 1854.

Molecular-Mechanik, c. 1860 bis c. 1880.

sich intensiv mit der Gestaltung von Strömungen innerhalb einer Flüssigkeit beschäftigt und dabei auch die Zähigkeit der Flüssigkeiten zur Erklärung benutzt. Er nahm nämlich an, dass die Theilchen einer Flüssigkeit durch die Kräfte derselben in einer gewissen Entfernung von einander gehalten werden, so dass die Natur der Flüssigkeit selbst der Bewegung eines Theilchens in derselben nach allen Richtungen hin



Widerstand leistet, dass dieser Widerstand abhängt von der Lage des Theilchens gegen die Wand des Gefässes, gegen die Oberfläche der Flüssigkeit und von der verschiedenen Zähigkeit der Flüssigkeit nach den verschiedenen Richtungen hin. Aus diesen Voraussetzungen ergab sich, dass ein Strom in einer Flüssigkeit immer nach der Gegend des grössten Trennungswiderstandes hin abgelenkt wird, und danach erhielt er für Strömungen von prismatischem Querschnitt folgende Gesetze: Die Strömungen dehnen sich beim Fortschreiten immer so aus, dass ihr Querschnitt an Flächeninhalt gewinnt; die Strömungsgeschwindigkeit nimmt von der Achse des Prismas nach der Oberfläche hin ab; zwei Strömungen, die in einem Winkel auf einander zueilen oder von einander wegstreben, kehren sich stets ihre convexe Seite, Strömungen aber, von denen die eine nach der Winkelspitze hin, die andere von derselben weggeht, kehren einander die concave Seite zu; ruhiges Wasser verhält sich wie entgegengesetzt fliessendes, und daraus folgt zuletzt noch, dass überall da, wo ein Strombett eine plötzliche Erweiterung erfährt, oder wo



eine Strömung in eine ruhende Flüssigkeit eintritt, sich Strudel oder Wirbel bilden müssen. Allgemeineres Interesse jedoch erregten in der neueren Zeit nur die Wirkungen, welche Luft- oder Wasserstrahlen in

Molecular-Mechanik, c. 1860 bis c. 1880.

seitlichen Richtungen auf umgebende, ruhende Luft- oder Wasserschichten ausüben, und die Saugapparate, welche sich auf diese Wirkungen gründen liessen. Nach Henry James [1]) haben zuerst Hawksbee [2]) und später Leslie experimentell bewiesen, dass der Druck am Boden eines leeren, nur mit Luft gefüllten Gefässes sich vermindert, wenn man durch dasselbe einen horizontalen Luftstrom hindurchbläst, der durch eine weitere Oeffnung ausströmt als er eingeht; entsprechend haben Bernoulli [3]) und Venturi gezeigt, dass ein Wasserstrom, welcher durch eine sich conisch erweiternde Röhre geht, auf das Wasser in einer seitlich angebrachten Röhre eine saugende Wirkung ausübt. Der Letztere hatte überhaupt im Jahre 1797 [4]) sich allgemeiner mit der seitlichen Uebertragung der Strömungsbewegungen in einer Flüssigkeit beschäftigt. Er bemerkte auch, dass ein Wasserstrahl, der auf eine ruhende Wasserfläche stösst, eine Menge Luft mit sich in das Wasser einführt, und erklärte das Mitführen dieser durch die Adhäsion zwischen der Luft und dem Wasserstrahl. Diese Erscheinungen sind dann mannigfach im Einzelnen berührt, aber doch erst durch Magnus von 1850 an in mehr zusammenhängender Weise behandelt worden. Magnus constatirte [5]), dass immer seitlich von dem Strome, der durch eine Flüssigkeit geht, ein Druck geringer als der herrscht, welcher beim Stillstehen des Stromes wirksam sein würde. Das Mitführen der Luft durch einen Wasserstrahl aber führte er weniger auf eine directe Adhäsion der Luft an den letzteren, als vielmehr auf eine mechanische Einschliessung derselben in den discontinuirlichen Flüssigkeitsstrahl zurück. In ähnlicher Weise leitete auch Tyndall [6]) die letztere Erscheinung, trotzdem er Einiges gegen Magnus vorbrachte, doch vor Allem aus der unregelmässigen Gestalt des Strahles ab und machte zur Erläuterung darauf aufmerksam, dass auch Strahlen aus Schrotkörnern oder Fäden, die mit Knoten versehen sind, Theile der Flüssigkeiten, durch die sie hindurchgehen, mit sich fortreissen. Man hat danach bis in die neueste Zeit alle diese Vorgänge als Erscheinungen des sogenannten dynamischen Druckes beschrieben, hat der Ursache der Verkleinerung des Druckes um einen bewegten Körper aber nicht weiter nachgeforscht und den unleugbaren Zusammenhang dieser Erscheinungen mit der inneren

---

[1]) Edinb. Phil. Trans. XX, p. 379, 1853 (gel. 15. März 1852). James verdeutlicht die Angaben durch die beiden a. S. 645 stehenden Zeichnungen.

[2]) An experiment to show the cause of the descent of the mercury in the barometer in a storm, Phil. Trans. 1704.

[3]) D. Bernoulli, Hydrodynamica, Strassburg 1738, p. 276. Die zweite der auf S. 645 gezeichneten Figuren entspricht Fig. 81 auf Tafel XII dieses Werkes.

[4]) Mém. s. la communication latérale du mouvement dans les fluides, appliqué à l'explication des différentes phénomènes hydrauliques, Bull. de la Soc. philomath. 1797.

[5]) Pogg. Ann. LXXX, S. 1, 1850; XCV, S. 1, 1856; CVI, S. 1. 1859.

[6]) Ibid. LXXXII, S. 294, 1851.

Molecular-Mechanik, c. 1860 bis c. 1880.

und äusseren Reibung der Flüssigkeiten nicht genauer untersucht. Dafür hat man diese Kräfte praktisch um so eifriger verwerthet. Im Jahre 1859 construirte Giffard nach dem Principe des dynamischen Druckes seinen Injector oder die Dampfstrahlpumpe; um dieselbe Zeit verfertigte Schimper seine Blasepumpe, die allerdings später erst unter anderen Namen (Zerstäubungsapparat, Rafraîcheur etc.) eine allgemeine Verbreitung fand; 1865 beschrieb H. Sprengel den Luftsauger (die Quecksilbersaugpumpe), und 1869 folgte ihm R. Bunsen mit der nach dem gleichen Princip construirten Wasserluftpumpe, die bald noch eine ganze Menge veränderter Formen nach sich zog.

Die Reibung der Flüssigkeiten hat mit der der festen Körper nur die Eigenschaft gemein, dass beide einen Widerstand darstellen, der der Bewegung zweier einander berührenden Stoffe entgegenwirkt. Im Uebrigen stimmten die Gesetze der flüssigen Reibung, ihre Unabhängigkeit vom Druck, ihre Proportionalität mit der Geschwindigkeit etc., nicht sowohl mit denen der Reibung fester Körper als vielmehr mit den Gesetzen der Reibung der Gase, und insofern regten die Beobachtungen der Reibung der Flüssigkeiten, nachdem die kinetische Theorie der Gase eine allgemeine Anerkennung errungen, auch zu einer mehr kinetischen Behandlung der Probleme der Flüssigkeiten an. Noch allgemeiner aber führten die Beobachtungen einer wechselseitigen Reibung zwischen festen, flüssigen und gasförmigen Körpern an ihrer Stelle dazu, bei der mechanischen Behandlung diese Formen der Materie nicht mehr so streng gesondert wie früher, sondern in lebendiger Verbindung zu halten. Auf eine solche Beurtheilung der Aggregatzustände wiesen überhaupt alle die erwähnten Arbeiten aus der Molecularphysik hin. Sie liessen immer mehr erkennen, dass diese Zustände nicht absolute Verschiedenheiten, sondern nur graduell unterschiedene Modificationen andeuten. Früher hatte man fest, flüssig und luftförmig als ursprüngliche Daseinsformen der Materie angesehen, die durch grosse Klüfte von einander geschieden seien, und die Naturphilosophen, wie selbst Kant noch in seinen metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft, hatten es immer als eine ihrer Hauptaufgaben aufgefasst, dieses dem Physiker gegebene Räthsel einer dreifachen Existenzfähigkeit der Materie philosophisch zu lösen. Jetzt zeigte sich, dass diese dreifache Art der Existenz nur eine dreifache Form der Erscheinungen sei, welche, mehr durch die Wechselwirkung der Materien als durch die innere Natur derselben bedingt, überall stetig und ohne trennende Grenzen in einander übergeführt werden könnten. Damit entstand die neue Aufgabe, für alle Stoffe die Möglichkeit der Erscheinung in allen drei Aggregatzuständen festzustellen und die Bedingungen einer sicheren Ueberführung aus einem Zustande in den anderen genau zu untersuchen. Durch diese Aufgabe aber zeigte sich auch, dass die thermischen Molecularbewegungen, die

Molecular-Mechanik, c. 1860 bis c. 1880.

vorzüglich den Aggregatzustand eines Körpers bedingen, nicht bloss für das engere Gebiet der Wärmelehre, sondern auch für unsere Ansicht von der Constitution der Körper von fundamentaler Wichtigkeit sind und dass die Annahme der Wärme als einer Art der Bewegung ihrerseits auch direct zu einer kinetischen Betrachtungsweise der Materie hindrängt.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Cagniard-Latour hatte im Jahre 1822[1]) die merkwürdige Beobachtung gemacht, dass Aether, Alkohol und Wasser in hermetisch verschlossenen Röhren bei sehr starker Erhitzung, trotzdem sich die Flüssigkeiten dabei nur auf das Zwei- oder höchstens das Vierfache ihres früheren Volumens ausdehnen konnten, scheinbar vollständig in Dampf verwandelt wurden. Er konnte die Versuche, weil die Glasröhren von den heissen Flüssigkeiten angegriffen wurden und die Explosionsgefahr eine sehr grosse war, nicht vollenden, und lange Zeit wurden dieselben nicht richtig gewürdigt. Erst Th. Andrews erwies ihre volle Wichtigkeit, als er in den sechziger Jahren das Problem umkehrte und sich die Frage vorlegte, wie es möglich sei, dass ein Gas, auch wenn es auf ein so geringes Volumen gebracht werde, doch seinen Gaszustand behalten könnte. Er kam dabei zu Resultaten[2]), welche jenen Versuchen von Cagniard-Latour entsprachen, aber viel weittragender und aufklärender waren. „Bei partiellem Liqueficiren, so beschreibt er seine damaligen Erfahrungen, von Kohlensäure durch blossen Druck und gleichzeitigem, allmäligem Steigern der Temperatur bis 88° F. wurde die Trennungsfläche zwischen der Flüssigkeit und dem Gas immer schwächer, sie verlor ihre Krümmung und verschwand endlich ganz. Der Raum wurde dann eingenommen von einer homogenen Flüssigkeit, welche, wenn man den

---

[1]) Ann. de chim. et de phys. (2) XXI, p. 127 und 178; XXII, p. 140, 1822 und 1823.

[2]) Diese Versuche sind in der dritten Auflage von Miller's Chemical Physics nach einem Briefe von Thom. Andrews zuerst veröffentlicht. Derselbe hatte schon 1861 mit den Versuchen begonnen und in diesem Jahre gefunden, dass Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Kohlenoxydgas und Stickstoffoxyd durch die vereinigte Wirkung von Druck und Kälte bis auf $1/_{500}$ ihres Volumens zurückgeführt werden, ohne dass sie sich verflüssigen. (Report of the Brit. Ass. 1861, Transact. of the Sect., p. 76.) Doch hatten einzelne Physiker auch vor Andrews schon wieder auf Cagniard-Latour's Beobachtungen zurückgegriffen. Faraday sagte in der schon früher (S. 460) erwähnten Abhandlung On the liquefaction and solidification von 1845: „I am inclined to think that at about 90° (F.) Cagniard de Latour's state comes in with carbonic acid.“ Wolf und Drion hatten Ende der fünfziger Jahre für einige Flüssigkeiten die Temperaturen zu bestimmen versucht, bei welchen dieselben in den Cagniard-Latour'schen Zustand übergingen. (Ladenburg, Gesch. d. Chemie, S. 341.) Mendelejeff aber hatte 1861 diesen Zustand als denjenigen erkannt, bei welchem sowohl die Cohäsion als die Verdampfungswärme beide gleich Null sind, und der betreffenden Temperatur den besonderen Namen des absoluten Siedepunktes beigelegt. (Ann. d. Chem. und Pharm. CXIX, S. 1.)

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Druck plötzlich verringerte oder die Temperatur ein wenig erniedrigte, ein eigenthümliches Ansehen von sich bewegenden oder flatternden Streifen durch die ganze Masse hin annahm. Bei Temperaturen über 88$^0$ konnte keine scheinbare Liquefaction der Kohlensäure oder Trennung in zwei verschiedene Aggregatzustände hervorgebracht werden, selbst wenn ein Druck von 300 bis 400 Atmosphären angewandt wurde. Salpetrige Säure gab analoge Resultate“ [1]).

Sechs Jahre später, im Jahre 1869 [2]), gab Andrews genauere Feststellungen und weitere Erklärungen dieses merkwürdigen Verhaltens der Gase. Er füllte die zu untersuchenden Gase in sehr starke, oben zugeschmolzene gläserne Capillarröhren und sperrte ein gewisses Gasvolumen durch einen Quecksilberindex ab [3]). Mit dem offenen Ende wurden die Röhren dann in ein mit Wasser ganz gefülltes Gefäss wasserdicht eingesetzt, in welchem man durch weiteres Einschrauben einer langen, sehr genau gedrehten, stählernen Schraube den Druck auf 400 Atmosphären steigern konnte. Die Capillaren, welche die zu comprimirenden Gase enthielten, wurden dabei durch strömendes Wasser auf constanter Temperatur erhalten und die bestimmten Volumina, welche dem immer gesteigerten Drucke bei diesen Temperaturen entsprachen, genau gemessen. Die Temperaturen der einzelnen Versuchsreihen lagen zwischen 13,1 und 48,1$^0$ C.; die Resultate stellte Andrews zur besseren Uebersicht in Tabellen zusammen und veranschaulichte sie auch in Curven, deren Abscissen dem jeweiligen Druck und deren Ordinaten dem zugehörigen Volumen proportional waren. Die Betrachtung dieser Tabellen oder Curven [4]) lässt erkennen, dass bei niederem Druck auch ein condensirbares Gas, z. B. die Kohlensäure, sich wie ein vollkommenes Gas dem Mariotte'schen Gesetze gemäss verhält, dass aber von einem gewissen Drucke an das Volumen sehr beträchtlich abnehmen kann, ohne dass der Druck merklich wächst. Das Eintreten der letzteren Erscheinung zeigt an, dass in diesem Zustande die gasförmige Kohlensäure sich condensirt und theilweise als Gas, theilweise als Flüssigkeit existirt. Mit der Vollendung der Condensation steigt dann der Druck selbst bei kleiner Volumenveränderung ins Ungeheure. Vergleicht man nun mehrere Curven desselben Gases für verschiedene Temperaturen mit einander, so sieht man, dass der Zustand, wo Flüssigkeit und Gas

---

[1]) Pogg. Ann. Erg. V, S. 65.

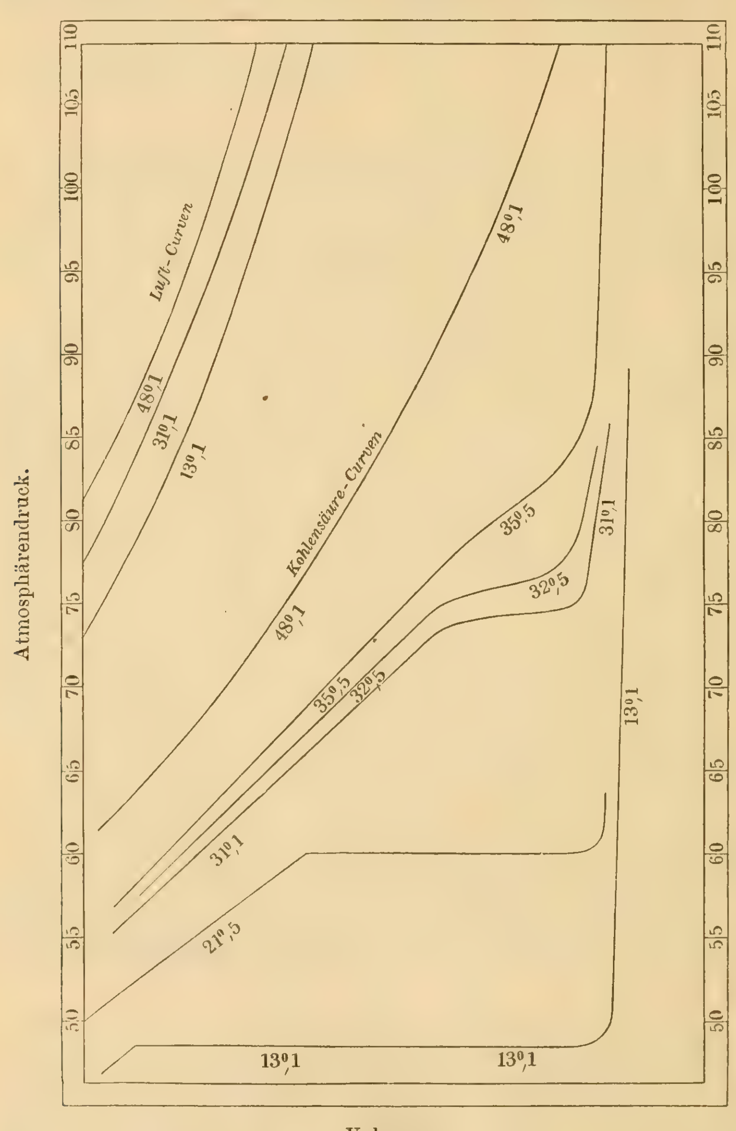
[2]) Phil. Trans. 1869, p. 575; Pogg. Ann. Erg. V, S. 64, 1871.

[3]) Um die Capillarröhren ganz rein mit Kohlensäure zu füllen und die atmosphärische Luft so viel als nur möglich auszutreiben, liess Andrews vor dem Zuschmelzen die Kohlensäure 24 Stunden lang durch die Capillarröhre hindurchströmen; doch zeigte sich selbst dann noch in den Röhren ein nicht zu beseitigender Rückstand an atmosphärischer Luft von $^1/_{500}$ bis $^1/_{1000}$ des gesammten Volumens der Kohlensäure. (Pogg. Ann. Erg. V, S. 66.)

[4]) Die a. f. S. stehende Figur ist die Copie einer von Andrews gegebenen und in Pogg. Ann. Erg. V. Taf. II. Fig. 9 reproducirten Tafel.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

zusammen existiren, wo also die Curve nahezu eine Parallele zur Ordinatenachse ist, bei einer höheren Temperatur auch erst bei einem höheren Druck einsetzt und schon bei einem grösseren Volumen als vorher ver-




schwindet, dass also dieser Zustand kürzere Zeit währt als früher. Von einer gewissen, aber für jedes Gas besonderen Temperatur, wie bei Kohlensäure von 31,1° an, verschwindet dann jener Zustand ganz, die

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Druckvermehrung geht stetig mit der Volumenverminderung fort, das Gas folgt nahezu vom Anfang bis zu Ende dem Mariotte'schen Gesetz, und in der Capillare zeigt sich keine Spur von Flüssigkeit [1]). „Was ist der Zustand der Kohlensäure, so fragt nun Andrews, wenn sie bei Temperaturen über 31° aus dem gasigen Zustande in das Volumen der Flüssigkeit übergeht, ohne zu irgend einer Zeit des Processes Anzeichen von eingetretener Liquefaction zu liefern? Verbleibt sie im gasigen Zustande oder wird sie flüssig? . . . Nach der mir richtig erscheinenden Auslegung der beschriebenen Versuche ist die Antwort auf die vorstehende Frage durch die innigen Beziehungen gegeben, welche zwischen dem gasigen und flüssigen Aggregatzustande existiren. Der gewöhnliche Gas- und gewöhnliche Flüssigkeitszustand sind, kurz gesagt, nur weit von einander getrennte Arten eines und desselben Aggregatzustandes und können durch eine Reihe so allmäliger Abstufungen in einander übergeführt werden, dass nirgends eine Unterbrechung oder Continuitätsstörung in diesem Uebergange bemerkbar ist . . . Unter gewissen Bedingungen von Temperaturen und Druck befindet sich die Kohlensäure zwar gewissermaassen in einem Zustande von Instabilität und geht plötzlich, ohne zusätzliche Anwendung von Druck- oder Temperaturveränderungen, in das Volumen über, welches sie bei dem continuirlichen Processe nur durch einen langen Umweg erreichen kann. Bei der plötzlichen Veränderung, welche hier eintritt, zeigt sich im Fortgange des Processes ein merklicher Unterschied zwischen den optischen und den übrigen physikalischen Eigenschaften der Kohlensäure, welche zu einem kleineren Volumen zusammengesunken ist, und derjenigen, welche es (das Volumen) noch nicht verändert hat, es hat daher keine Schwierigkeit, die Flüssigkeit von dem Gase zu unterscheiden. Allein in anderen Fällen ist diese Unterscheidung nicht möglich . . . Bei 35,5° und 108 Atmosphären Druck steht die Kohlensäure mitten zwischen Gas und Flüssigkeit, und wir haben keinen triftigen Grund, ihr den einen Aggregatzustand eher als den anderen beizulegen . . . Die in dieser Mittheilung beschriebenen Eigenschaften der Kohlensäure sind aber nicht bloss dieser eigen, sondern finden sich allgemein bei allen Körpern, welche als Gas und als Flüssigkeit erhalten werden können. Stickstoffoxyd, Ammoniak, Schwefeläther und Schwefelkohlenstoff, alle zeigen bei bestimmten Drucken und Temperaturen kritische Punkte und rasche Volumenveränderungen mit flatternden Bewegungen, wenn Temperatur und Druck in der Nähe dieser Punkte verändert werden . . . Die Unterscheidung von Gas und

---

[1]) Bei niederen Temperaturen sind die Druckcurven also unstetig und bestehen aus drei discontinuirlich in einander übergehenden Theilen, bei höheren Temperaturen nähern sie sich immer mehr der Stetigkeit und gehen nach und nach in die gleichseitige Hyperbel über, die durch $p\,v = C$ dargestellt wird.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Dampf ist bisher auf ganz willkürliche Principien gegründet. . . Die Unterscheidung ist durch den unbedeutenden Umstand bedingt, dass der Siedepunkt der Flüssigkeit unter dem gewöhnlichen Druck der Atmosphäre höher oder niedriger ist, als die gewöhnliche Temperatur der Atmosphäre . . . Wir können nun sagen: Ein Dampf sei ein Gas bei jeglicher Temperatur unter seinem kritischen Punkt. Dieser Definition zufolge kann ein Dampf durch Druck allein in eine Flüssigkeit verwandelt werden und vermag deshalb in Gegenwart seiner eigenen Flüssigkeit zu existiren, während ein Gas nicht durch Druck liqueficirt, d. h. nicht durch Druck so verändert werden kann, dass eine Flüssigkeit getrennt von dem Gas durch eine sichtbare Oberfläche unterschieden werden kann. Nach dieser Definition würde die Kohlensäure unter 31⁰ ein Dampf, über 31⁰ ein Gas sein." Andrews schliesst seine Abhandlung mit den Worten: „Ein Problem von weit grösserer Schwierigkeit bleibt noch zu lösen: Die mögliche Continuität des flüssigen und festen Aggregatzustandes; die schöne, vor einigen Jahren von James Thomson gemachte und experimentell von Sir William Thomson bestätigte Entdeckung über den Einfluss des Druckes auf die Temperatur, bei welcher Liquefaction (Solidification) eintritt, deutet, wie mir scheint, die Richtung an, welche die Untersuchung nehmen muss" [1]).

In einer späteren Fortsetzung [2]) seiner Arbeiten ging Andrews vorzüglich auf eine Prüfung des Dalton'schen Gesetzes aus. Indem er eine Mischung von Kohlensäure und Stickstoff stark comprimirte, fand er, dass die Dalton'sche Ansicht, nach der die Theilchen verschiedener Gase keine Kräfte auf einander ausüben, unrichtig ist, und dass der kritische Punkt der Kohlensäure z. B. durch Zumischung auch nur eines Zehntel Volumens Luft oder Stickstoff schon um einige Grade herabgesetzt wird. Das Dalton'sche Gesetz, wie auch das Boyle-Mariotte'sche und das Dalton-Gay-Lussac'sche, gelten danach selbst für ungemischte Gase nur, wenn dieselben unter schwachem Drucke und bei Temperaturen weit über den kritischen Punkten sich befinden. In Bezug auf die bisher sogenannten permanenten Gase aber betont Andrews schliesslich, dass der kritische Punkt derselben „wahrscheinlich weit unter der niedrigsten bisher erhaltenen Temperatur liegt", und dass nur darum die Verflüssigung derselben noch nicht gelungen ist.

Diesem Winke folgend, gelangten am Ende des Jahres 1877 zwei Physiker, Cailletet und Pictet, gleichzeitig dazu, die permanenten Gase zu verflüssigen. L. Cailletet hatte schon 1870 [3]) atmosphärische

[1]) Pogg. Ann. Erg. V, S. 82 bis 87.

[2]) Proceedings of the Royal Society XXIII, p. 514 und XXIV, p. 455, 1871 und 1872.

[3]) Compt. rend. LXX, p. 1131, 1870. Aus diesen Versuchen berechnete J. D. van der Waals noch vor 1873 eine kritische Temperatur des Sauerstoffs von $-158^0$, allerdings nicht unbedeutend zu hoch (Ueber den Uebergangszustand zwischen Gas und Flüssigkeit, Leyden 1873, nach Beiblätter zu Pogg. Ann. I, p. 18).

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Luft und Wasserstoff Druckkräften bis zu 700 Atmosphären ausgesetzt und für den Quotienten $\frac{vp}{v_1 p_1}$ (den Volumen und Drucken zu Anfang und Ende der Versuche entsprechend) in allen Fällen eine Abnahme constatirt. Derselbe ging bei Luft mit einer Vergrösserung des Drucks von 60 auf 705 Atmosphären von 1,0131 bis auf 0,6660 und bei Wasserstoff mit einer Verstärkung des Drucks von 60 auf 605 Atmosphären von 0,9810 bis auf 0,7580 zurück. In der ersten Hälfte des Jahres 1877 beschäftigte er sich dann mit der Construction von Manometern für sehr hohen Druck, sowie mit der Verflüssigung von Acetylen und Stickstoffdioxyd. Am 16. December 1877 aber zeigte er in dem chemischen Laboratorium der École normale supérieure vor einer grösseren Anzahl Gelehrter, dass Sauerstoff oder Kohlenoxyd zwar bei einer Temperatur von — 29° und einem Druck von 300 Atmosphären noch immer flüssig blieben, dass aber in dem Apparate, wenn man die Gase rasch sich ausdehnen liess, durch die stattfindende Temperaturerniedrigung (bis um 200°) direct Nebel auftraten, die nur durch ein Fest- oder Flüssigwerden der Gase zu erklären waren. Etwas später, am 31. December desselben Jahres, gelang es ihm, dieselbe Erscheinung auch am Stickstoff und am Wasserstoff hervorzurufen [1]). R. Pictet stellte zuerst bleibende Mengen von Flüssigkeiten aus permanenten Gasen her [2]). Er kühlte den Compressor seines Apparates durch verdampfende Kohlensäure bis auf — 140°. Eine Dampfmaschine von 15 Pferdekräften brachte Sauerstoffgas unter einen Druck von 320 Atmosphären. Aus dem Verdichtungsgefässe entwich dann beim Oeffnen des Hahns der Sauerstoff mit solcher Heftigkeit, dass ein Theil desselben durch die Verdunstungskälte verflüssigt und beim Neigen des Apparates in einem kräftigen Strahle herausgeschleudert wurde. Bei einem Versuche am 22. December 1877 waren so mehrere Cubikcentimeter flüssigen Sauerstoffs erzeugt worden. Auch Wasserstoff erhielt Pictet auf dieselbe Weise in flüssiger Form.

In grösseren Quantitäten verflüssigten die sogenannten permanenten Gase zuerst Sigmund v. Wroblewsky und K. Olszewski im Jahre 1882 [3]). Durch das Sieden von reinem Sauerstoff erhielt dann

---

[1]) De la condensation de l'oxygène et de l'oxyde de carbone, Compt. rend. LXXXV, p. 1213. Sur la condensation des gaz réputés incoërcibles, ibid., p. 1270. Auch Ann. de chim. et de phys. (5) XV, p. 132, 1878.

[2]) Expériences sur la liquéfaction de l'oxygène, Compt. rend. LXXXV, p. 1214 und 1276. Mémoire sur la liquéfaction de l'oxygène, la liquéfaction et la solidifaction de l'hydrogène et sur les théories des changements d'état des corps, Archives des sciences physiques et naturelles LXI, p. 16, Januar 1878. — Raoul Pictet, Physiker in Genf.

[3]) Sur la liquéfaction de l'oxygène et de l'azote, Compt. rend. XCVI, p. 1140 und 1225, 1883; auch Wiedem. Ann. XX, S. 243, 1883. Sur la liquéfaction de l'hydrogène, Compt. rend. XCVIII, p. 304 u. 365, 1884.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Wroblewsky eine Temperatur von — 184°, von Luft entsprechend — 192,2°, von Stickstoff — 193,1°, von Kohlenoxyd — 193°; durch das Verdampfen der Gase im Vacuum erzielte er Temperaturen einige Grade unter — 200° C. [1]). Aehnliche, nur wenig abweichende Resultate erhielt auch Olszewski [2]), und beide Gelehrte empfahlen dann den Sauerstoff als das wirksamste Abkühlungsmittel. Am besten zur Bestimmung solcher niederen Temperaturen zeigten sich Wasserstoffthermometer, deren kritischer Punkt am tiefsten zu liegen scheint; Olszewski fand, dass solche Thermometer selbst bei einer Temperatur von — 220° C. nicht mehr als um 1° C. fehlerhaft sein können [3]). Der letztere Gelehrte ist auch weiter mit Erfolg bemüht gewesen, die physikalischen Constanten der neuen Flüssigkeiten zu bestimmen. Die Dichte von flüssigem Sauerstoff, dessen kritischer Punkt bei — 118,8° liegt, ergab sich dabei zu 1,124 (bei — 181,4°) und die Dichte von flüssigem Stickstoff (kritische Temperatur — 146°) zu 0,885 (bei — 194,4°) [4]).

Andrews hatte als kritischen Punkt eines Gases denjenigen Temperaturgrad bestimmt, wo die Flüssigkeit nicht mehr mit ihrem eigenen Dampf zusammen existiren kann. Andere Physiker bemühten sich dann, den physikalischen Gründen dieser Erscheinung nachzugehen. J. B. Hannay [5]) erklärte als einzig sicheres Unterscheidungszeichen einer Flüssigkeit und eines Gases das Ueberwiegen der Cohäsion über die lebendige Kraft der Molecüle oder das Vorhandensein einer Oberflächenspannung in der ersteren. Der kritische Punkt einer Flüssigkeit ist danach diejenige Temperatur, bei welcher die Cohäsion oder die Oberflächenspannung oder die Capillarität verschwindet. Die Thatsache, dass der kritische Punkt nicht vom Druck, sondern von der Temperatur abhängig ist, zeigt, dass der gasige Zustand der Materie nicht sowohl von der freien Weglänge der Molecüle, als vielmehr von der mittleren Geschwindigkeit derselben ab-

---

[1]) Sur la temperature qu'on obtient à l'aide de l'oxygène bouillant, Compt. rend. XCVII, p. 1553, und XCVIII, p. 982. — Dr. S. v. Wroblewsky, Professor der Physik in Krakau, starb daselbst am 17. April 1888 im 40. Lebensjahre.

[2]) Temperature de solidification de l'azote et du protoxyde de carbone, relation entre la temperature et la pression de l'oxygène liquide, Compt. rend. C, p. 350, 1885. Durch Vermindern des Drucks über erstarrtem Stickstoff bis auf 4 mm erreichte Olszewski die niederste Temperatur, — 225° C.

[3]) Vergleich von Gasthermometern bei niederen Temperaturen, Sitzungsberichte der math.-naturw. Cl. d. Krakauer Akad. d. Wiss. XIV, p. 283, 1886; Beiblätter zu Pogg. Ann. X, S. 679.

[4]) Wiedem. Ann. XXXI, S. 58, 1887.

[5]) On the state of fluids at their critical temperatures, Proc. of the Roy. Soc. XXX, p. 478, 1880. On the limit of the liquid state, ibid. XXXI, p. 520, 1881, und ibid. XXXIII, p. 294, 1882.

hängt und dass eine gewisse lebendige Kraft der Molecüle, unabhängig vom Druck, jede bleibende, feste Gruppenbildung derselben zu hindern vermag. Hannay unterscheidet danach vier verschiedene Aggregatzustände: 1) den gasförmigen, der sich von der höchsten Temperatur bis zu einer Isotherme durch den kritischen Punkt erstreckt und in welchem die grosse lebendige Kraft der Molecüle jede Cohäsionswirkung hindert, 2) den dampfförmigen und 3) den flüssigen, die beide von der obigen Isotherme bis zu einem festen oder dem absoluten Nullpunkte reichen und die sich durch das Verhältniss der molecularen Weglänge zur Cohäsion unterscheiden, und endlich 4) den festen[1]. Auch J. D. van der Waals[2], der in mehreren Abhandlungen sich erfolgreich mit der mathematischen Theorie der Gase beschäftigte, gab eine der vorigen nicht unähnliche Erklärung der kritischen Temperatur. Indem er den Molecülen bei bestimmter Grösse nur anziehende Kräfte beilegte und die Repulsion durch die Bewegung derselben erklärte, kam er zu Zustandsgleichungen für die elastisch- und tropfbarflüssigen Materien, aus denen noch das Dasein eines Zwischenzustandes mit labilem Gleichgewichte hervorging. Die kritische Temperatur ist dann diejenige, über welcher ein solcher Zustand labilen Gleichgewichtes nicht mehr möglich ist.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Von einem ganz anderen Gesichtspunkte aus, der die Ausnahmestellung des kritischen Punktes beträchtlich abschwächte, erklärte J. Jamin[3] die Andrews'sche Entdeckung. Wenn man eine Flüssigkeit in einem vollständig geschlossenen Raume erhitzt, so nimmt die Menge des über der Flüssigkeit lagernden Dampfes sehr schnell zu, und seine

---

[1]) Hannay hatte zuerst geglaubt, das Lösungsvermögen der Flüssigkeiten festen Körpern gegenüber als Unterscheidungsmerkmal von den Gasen anführen zu können, hat aber mit J. Hogarth gefunden, dass auch die Gase feste Körper aufzulösen vermögen (Proc. of the Roy. Soc. XXIX, p. 324, 1879; XXX, p. 178 und 484, 1880). Wurde nämlich in einer Flüssigkeit ein fester Körper gelöst, dessen Schmelztemperatur weit über dem kritischen Punkte der Flüssigkeit lag, und wurde nach und nach die Temperatur gesteigert, so blieb der Körper in Lösung, selbst wenn die Temperatur bis $130^0$ über den kritischen Punkt stieg. Alkohol und Aether zwar schieden das gelöste Eisenchlorid gerade unterhalb des kritischen Punktes aus, aber dasselbe löste sich in dem Gase wieder auf, wenn die Temperatur 8 bis $10^0$ über den kritischen Punkt gesteigert wurde. Auf diese Erscheinung lassen sich vielleicht die widersprechenden Resultate zurückführen, die Cailletet und Hautfeuille 1880 mit flüssiger, durch blaues Galbanumöl gefärbter Kohlensäure erhielten, bei denen der Farbstoff mit dem Erreichen des kritischen Punktes der Kohlensäure sich ausschied (Compt. rend. XCII, p. 840, 1881). Hoher Druck und hohe Temperatur, d. h. grosse Nähe und grosse lebendige Kraft der Molecüle sind nach Hannay Bedingung zur Auflösung der festen Körper in Gasen.

[2]) Ueber den Uebergangszustand zwischen Gas und Flüssigkeit, Leyden 1873; Referat in Beibl. z. Pogg. Ann. I, S. 10; Die Continuität des gasförmigen und flüssigen Zustandes, deutsch von Fr. Roth, Leipzig 1881.

[3]) Compt. rend. XCVI, p. 1448, 1883.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Dichte wächst in demselben Verhältniss wie sein Gewicht. Andererseits aber erfährt der flüssig gebliebene Theil eine wachsende Ausdehnung, welche zuletzt die der Gase übertrifft (Thilorier); folglich giebt es schliesslich eine Grenztemperatur, wo Flüssigkeit und Dampf dasselbe Gewicht bei demselben Volumen haben. Von da an bleiben sie nicht mehr gesondert, das Ganze nimmt vielmehr einen gleichmässigen Zustand an, den man für gasförmig hält. Damit ist nach Jamin der kritische Punkt erreicht, welchen man als die Temperatur bezeichnen kann, bei welcher eine Flüssigkeit und ihr gesättigter Dampf dieselbe Dichte haben. Als Bestätigung seiner Theorie führt Jamin einen Versuch Cailletet's vom Jahre 1880 an. Der Letztere hatte nämlich in seinem Apparate ein Gemisch von 1 Thl. Luft und 5 Thln. Kohlensäure comprimirt und sah zunächst die Kohlensäure bei einem mittleren Drucke flüssig werden. Als er dann aber, ohne die Temperatur zu ändern, den Druck bis auf 150 oder 200 Atmosphären steigerte, sah er die gebildete Flüssigkeit in ihrer Gesammtheit wieder verschwinden. Wenn es nun wahr ist, dass das Verschwinden der verflüssigten Kohlensäure, wie es Jamin's Theorie verlangt, nur von dem Gleichwerden der Dichten herrührt, so muss das Verschwinden sich verzögern, wenn man die Luft des Gemisches durch ein weniger dichtes Gas, etwa durch Wasserstoff, ersetzt. Wirklich zeigte sich, als Cailletet[1]) auf Jamin's Veranlassung 5 Vol. Kohlensäure einmal mit 1 Vol. Luft, das andere Mal mit 1 Vol. Wasserstoff mischte, für die letzte Mischung immer ein bedeutend grösserer Druck zum Eintreten der erwähnten Erscheinung nöthig als bei ersterer. W. Ramsay reclamirte übrigens in einem Schreiben an die Pariser Akademie die Priorität für diese Theorie des kritischen Punktes[2]) und berief sich dabei nicht mit Unrecht auf die schon drei Jahre früher[3]) von ihm veröffentlichte Stelle: „Der kritische Punkt ist der, bei welchem die Flüssigkeit in Folge ihrer Ausdehnung und das Gas in Folge seiner Compression das gleiche specifische Gewicht erreicht haben und sich daher mischen. Da die Flüssigkeit durch Abkühlung sich stärker zusammenzieht als das Gas, so scheidet sie sich aus dem gleichmässigen Gemisch als Wolke in der ganzen Röhre ab und sinkt dann wegen ihres specifischen Gewichtes zu Boden.“ Dabei aber lässt sich nicht verkennen, dass die Ramsay-Jamin'sche Vorstellung trotz ihrer scheinbaren Einfachheit doch bedeutende Schwierigkeiten in sich birgt; denn sie verlangt, dass wir uns denselben Stoff bei demselben (äusseren) Druck und derselben Temperatur sowohl als flüssig wie auch als gasförmig, wie auch in beiden Formen gleichzeitig vorstellen können.

---

[1]) Compt. rend. XCII, p. 901, 1881.

[2]) Phil. Mag. (5) XVI, p. 118, 1883.

[3]) Proc. Roy. Soc. XXXI, p. 194, 1880. — W. Ramsay, Prof. der Chemie am University-College in Bristol.

Andrews hatte, wie schon erwähnt, in seiner Arbeit von 1869 die Erwartung ausgesprochen, dass sich wie eine Continuität des gasigen und flüssigen, auch eine solche des flüssigen und festen Aggregatzustandes ergeben werde, und dazu auf die Thomson'schen Experimente über die Erniedrigung des Schmelzpunktes des Eises durch Druck hingewiesen. Merkwürdiger Weise zeigte sich zuerst eher eine Annäherung des festen an den gasigen als an den flüssigen Zustand. Nach Dalton siedet jede Flüssigkeit, wenn ihre Dampfspannung dem auf ihr lastenden Druck gleich wird, unter einem geringeren Druck kann sie als solche nicht existiren. Ein fester Körper, der auf eine so hohe Temperatur gebracht wird, dass die Dampfspannung seiner Flüssigkeit den herrschenden Druck überwiegt, muss also, ohne zu schmelzen, direct verdampfen. Da aber nach dem Dalton'schen Diffusionsgesetze ein Gas unabhängig von dem Vorhandensein eines anderen sich ausbreitet, so lässt sich denken, dass auch unter gewöhnlichem Atmosphärendruck ein fester Körper verdampft, obgleich seine Dampfspannung noch bedeutend geringer ist als der Druck der Atmosphäre. Dieser Ansicht gemäss, die durch die neue Wärmetheorie nur begünstigt wird, sagte Clausius in seiner berühmten Abhandlung von 1857, in welcher er seine Verdampfungstheorie entwickelte: „Aehnlich wie bei flüssigen lässt sich auch bei festen Körpern die Möglichkeit einer Verdampfung einsehen; indess, so fährt er einschränkend weiter fort, folgt daraus nicht umgekehrt, dass an der Oberfläche aller festen Körper eine Verdampfung stattfinden müsse“ [1]. Zöllner liess diese Einschränkung ohne Weiteres fallen und ging in seinem Werke „Ueber die Natur der Kometen“ [2] direct von der Annahme aus, dass die Verdampfung unabhängig von dem Aggregatzustande sei, dass jeder Stoff bei jeder Temperatur, so lange nur der Druck der eigenen Dampfatmosphäre nicht zu gross werde, verdampfe und dass dabei die verschiedenen Stoffe nur durch die Grösse der Dampfspannungen, die bei denselben Temperaturen für Flüssigkeiten allerdings viel grösser als für feste Körper seien, sich unterschieden. Lothar Meyer [3] zeigte dann im Jahre 1875 experimentell wenigstens an einem Beispiele, dass es nur vom Druck abhängt, ob ein fester Körper beim Erwärmen erst durch den tropfbarflüssigen Zustand hindurch oder direct in den gasförmigen übergeht. Allgemeinere Beachtung aber fanden diese Vorgänge erst, als Thomas Carnelley [4] dem Andrews'schen Satze von

[1] Pogg. Ann. C, S. 240.

[2] Leipzig 1872, S. 86.

[3] Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft 1875, S. 1627. — Lothar Meyer, geb. am 19. August 1830, Prof. d. Chemie in Tübingen.

[4] The conditions necessary for the existence of matter in the liquid state. Existence of ice at high temperatures, Nature XXII, p. 434, 1880. Experiments on ice under low pressures, Nature XXIII, p. 341, 1881. Andrews hatte vom kritischen Druck in einem

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

der kritischen Temperatur geradezu einen anderen vom kritischen Druck gegenüberstellte, der da lautete: Um einen festen Körper in eine tropfbare Flüssigkeit verwandeln zu können, muss der Druck oberhalb eines gewissen Punktes liegen, den man den kritischen Druck nennen kann und unter welchem keine noch so hohe Wärme die Substanz schmelzen kann. Diesen kritischen Druck hatte Carnelley im Herbste 1879 für Quecksilberchlorid zu 420 mm gefunden. Im August 1880 gelang es ihm, denselben auch für Eis, nämlich auf 4,6 mm, zu bestimmen; bei einem Druck grösser als 4,6 mm schmolz das Eis mit der Erwärmung, bei einem geringeren aber sublimirte es. Dabei machte Carnelley noch die überraschende Bemerkung, dass die Temperatur des Eises, wenn nur der Druck niedrig genug gehalten wurde und die Erhitzung rasch genug erfolgte, weit über den Siedepunkt des Wassers hinaus, ja bis 180$^0$, gesteigert werden konnte. Carnelley's Angaben wurden zuerst von Wüllner[1]) geprüft; derselbe bestätigte dieselben auch vollkommen, soweit sie die Sublimation des Eises betrafen, konnte aber bei seinen Versuchen niemals eine Erwärmung des Eises über den Nullpunkt der Temperaturscala hinaus bemerken. Ebenso erging es Lothar Meyer[2]), und obgleich Carnelley die höhere Wärme des Eises nicht bloss thermometrisch, sondern auch calorimetrisch nachwies, so konnten doch die zahlreichen Arbeiten anderer Physiker bis jetzt nicht zu dem gleichen Ergebniss gelangen. Carnelley hatte seine Angaben dadurch verclausulirt, dass er erklärte, die Erhitzung dürfte keine zu grosse Fläche des Eises treffen, weil eine zu grosse Menge des Dampfes eine zu grosse Spannung erzeuge; es müsse aber die Erhitzung doch rasch genug erfolgen, weil sonst alle Wärme zur Verdampfung des Eises und kein Theil zur Temperaturerhöhung verwandt werde. Danach erscheint es immer noch möglich, dass die negativen Erfolge anderer Physiker, die Carnelley's Versuche nur in mehr oder weniger abgeänderter Form wiederholten, nicht von einer Unmöglichkeit der behaupteten Erwärmung des Eises, sondern nur von unzweckmässigen Einrichtungen herrührten[3]).

---

anderen als dem hier gebrauchten Sinne gesprochen, bei ihm bezeichnete dieses Wort den Druck, der dazu gehört, um ein Gas eben noch etwas unter seiner kritischen Temperatur zu verflüssigen.

[1]) Wiedem. Ann. XIII, S. 105, 1881.

[2]) Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft 1881, S. 718.

[3]) Für eine grössere Stabilität des festen Aggregatzustandes gegenüber dem flüssigen selbst bei Materien, die unter gewöhnlichen Umständen gasförmig sind, spricht folgende, von Landolt bemerkte wunderbare Thatsache. H. Landolt (Mitglied der Berl. Akad., geb. 1831) liess flüssige Kohlensäure in einen conischen Beutel aus Tuch einströmen und ballte den erhaltenen lockeren Schnee in einer starkwandigen, hölzernen Form durch Hammerschläge auf einen Stempel zu einem dichten Cylinder zusammen, der ungefähr die Härte von Kreide bekam und sich ohne Schaden mit der Hand locker anfassen liess. Solche Cylinder zeigten sich ziemlich haltbar, da die Vergasung nur an der

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Die vielfachen Uebergänge, welche zwischen dem festen und flüssigen Zustande in Wirklichkeit stattfinden, die weichen und halbflüssigen Formen, welche auch bei chemisch einfachen oder wenigstens homogenen Stoffen, wie Phosphor, Natrium, Blei u. s. w., vorkommen und die man hier jedenfalls nicht durch Lösung eines festen in einem flüssigen Stoff erklären kann, hat L. Pfaundler[1]) zuerst im Jahre 1876 behandelt und mit Erfolg aus der neuen Wärmetheorie abzuleiten versucht. Bei solchen, immer amorphen Körpern ist nach Pfaundler anzunehmen, dass die Lagen, Schwingungsrichtungen, Abstände etc. der einzelnen Molecüle sehr ungeordnet und verschieden sind. Lässt man nun einem solchen Stoffe Wärme zuströmen, so wird die Mitteltemperatur aller Molecüle steigen, und endlich wird ein Punkt kommen, wo die weiter zugeführte Wärme diejenigen Molecüle, welche momentan das Maximum lebendiger Kraft besitzen, in die Möglichkeit versetzt, ihre feste Gleichgewichtslage zu verlassen und als freie, flüssige Molecüle eine fortschreitende Bewegung anzunehmen. Unterbrechen wir jetzt die Wärmezufuhr, so haben wir unter vielen festen Molecülen einige flüssige. Es bleiben aber nicht dieselben Molecülindividuen immer im Besitze der fortschreitenden Bewegung. Durch die Zusammenstösse ist Veranlassung gegeben, dass sie ihren Ueberschuss auf andere übertragen, nur die mittlere Anzahl der flüssigen Molecüle wird constant bleiben. Weitere Wärmezufuhr vermehrt nun die Anzahl der flüssigen Molecüle, verringert die der festen. Findet diese Zufuhr rasch statt, so werden alle zuerst getroffenen Molecüle verflüssigt. Lässt man aber dann dem ganzen Systeme Zeit zum Ausgleich, so vertheilen sich nach und nach wiederum die flüssigen Molecüle gleichförmig in der ganzen Masse, vorausgesetzt, dass die Wärme nicht hinreichte, alle zu schmelzen. Bei fortgesetzter Wärmezufuhr werden die flüssigen Molecüle immer häufiger, die Gruppen fest verbundener Molecüle immer seltener, bis die letzteren endlich ganz verschwinden. Körper, deren Schmelzprocess so verläuft, heissen während desselben anfangs weich, dann halbflüssig; Körper von weichem Aggregatzustande sind also Gemische aus festen Molecülgruppen, mit flüssigen, d. i. fortschreitenden Molecülen, welche mit den festen fortwährend ihre Stelle wechseln. Nach dieser Definition lassen sich viele Eigenschaften der weichen Körper erklären. Biegt man einen weichen Körper rasch, so bricht er, biegt man ihn langsam, so bleibt er in der neuen Lage. Beim Biegen kommen nämlich die festen Molecüle des Körpers in eine gespannte, labile Lage, die flüssigen bleiben frei beweglich. Beim allmäligen Austausche der festen durch flüssige und Wiederersetzung durch feste

---

Oberfläche und zwar um so schwächer stattfand, je fester die Masse zusammengedrückt war. (Berichte der deutsch. chem. Ges. XVII, S. 309, 1884.)

[1]) Sitzungsber. d. Wien. Akad., 2. Abth., LXXIII, S. 249. — L. Pfaundler, geb. am 17. Februar 1839, Prof. der Physik in Innsbruck.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

lagern sich diese in stabiler Weise, daher die Spannung allmälig weichen muss. Die Biegung wird dadurch eine bleibende. Es ist klar, dass auf diese Weise die Formänderung allmälig beliebig weit getrieben werden kann, wenn man den Molecülen nur Zeit lässt, ihre gespannten Lagen durch ungezwungene zu ersetzen. Hierzu ist aber die Vermittlung der freien, fortschreitenden Molecüle nothwendig. Versucht man die Biegung zu rasch, so ist der fortgesetzte Austausch der festen Molecüle durch solche ungezwungene Lagen nicht im Stande, rasch genug zu folgen; der Körper bricht oder schnellt elastisch zurück, wenn der Druck aufhört. Auch die Eigenschaft der weichen Körper, sich durch Aneinanderdrücken zu einem Ganzen vereinigen zu lassen, erklärt sich nach denselben Principien. Die an der Grenzfläche der beiden Stücke befindlichen, momentan flüssigen Molecüle bilden beim Ersetztwerden durch feste Molecüle Verbindungsbrücken. Da es nicht wahrscheinlich ist, dass später wiederum gerade alle die in die Trennungsflächen fallenden festen Molecüle gleichzeitig flüssig werden, so hält die einmal hergestellte Verbindung, und zwar um so mehr, je länger sie besteht, da desto mehr flüssige Molecüle Zeit finden, sich dort als feste abzulagern.

Aehnliche Vorstellungen in Bezug auf Flüssigkeiten und Gase entwickelten F. Cintolesi und G. Cantoni. Cintolesi[1]) kam durch vielfältige, theilweise sehr überraschende mikroskopische Beobachtungen zu der Ueberzeugung, dass die Ausbreitung der Flüssigkeiten zu dünnen Häutchen stets begleitet ist von einer Entwickelung gasförmiger Massen in denselben und dass diese Erscheinung des Siedens in keiner Lamelle fehlt. Die Ausbreitung einer Flüssigkeit auf einer anderen, sowie das Zerreissen der Flüssigkeitshäutchen wird danach durch Dämpfe der eigenen Substanz bedingt, deren Molecüle wegen ihrer allseitigen Bewegungen die flüssigen Molecüle aus einander drängen. Cantoni[2]) schloss aus Versuchen von Amagat, nach denen für viele Flüssigkeiten die Coëfficienten der Zusammendrückbarkeit mit der Zunahme der Temperatur bedeutend wachsen, dass alle Flüssigkeiten Mischungen aus flüssigen und gasigen Molecülen sind, dass zwischen den flüssigen Molecülen, welche sich nur in sehr beschränktem Grade durch Wärme ausdehnen und durch mechanische Kraft zusammendrücken lassen, sich immer Dämpfe derselben Flüssigkeit (intermoleculare Dämpfe) befinden, deren Spannung für die herrschende Temperatur eine maximale ist. Die Hypothesen von Pfaundler, Cintolesi und Cantoni ruhen auf dem Maxwell'schen Princip, nach dem die Molecularbewegungen auch in gleichartigen Substanzen und bei vollständig homogener Temperatur doch nie gleichmässig vor sich

---

[1]) Reale Istituto Lombardo Rendiconti (2) IX, p. 187; Revue der Fortschr. der Naturw. 1878, S. 366.

[2]) Il nuovo Cimento (3) VI, p. 277; Revue d. Fortschr. d. Naturw., 1881, S. 23.

gehen, sondern vielmehr alle möglichen, nur um gewisse Mittelwerthe sich gruppirende Grössen besitzen. Maxwell hatte allerdings diese Hypothese nur auf Gase angewandt, aber im Princip scheint nichts dagegen zu sprechen, dieselbe auch über die anderen Aggregatzustände mit auszudehnen.



In gewissem Zusammenhange stehen mit diesen Arbeiten auch die Untersuchungen über die Einleitung der Umänderungen der Aggregatzustände. Gay-Lussac hatte die Beobachtung gemacht, dass das Wasser in Behältern von Metall leichter siedet als in gut gereinigten Glasgefässen [1]; später führte man die leichte Entwickelung der Dämpfe vor Allem auf einen Gehalt der Flüssigkeiten an Gasen zurück [2]. Diese letztere Ansicht zu sichern, bemühte sich L. Dufour von 1861 an in mehreren Abhandlungen [3]. Er brachte eine Mischung von Leinöl (specif. Gew. = 0,93) mit Nelkenöl (specif. Gew. = 1,05) genau auf das specifische Gewicht des Wassers, erwärmte dieselbe auf 120° und führte mit einer Pipette einen grossen Tropfen Wasser ein. Derselbe theilte sich in kleinere Tröpfchen, die sich, ohne zu verdampfen, erhielten. Wasser konnte so auf 170°, Chloroform auf 100° C. erwärmt werden, ohne zu sieden. Erst wenn die Tröpfchen mit einer Metall- oder Holzspitze berührt wurden, verwandelten sie sich plötzlich in Dampf. Die Spitzen verloren ihre Wirkung, wenn man sie, ohne sie an die Luft zu bringen, zur Verdampfung mehrerer Tropfen gebraucht hatte. Bei anderen Versuchen brachte Dufour angesäuertes, durch Kochen von Luft befreites Wasser in eine Glasretorte und evacuirte die Luft bis zu einem Drucke, der einem Siedepunkt von 60° entsprach. Dann konnte er bis auf eine Temperatur von 75° erwärmen, ohne dass das Sieden eintrat. Dies aber geschah augenblicklich, wenn er durch Einleiten eines elektrischen Stromes das Aufsteigen von Gasblasen in der Flüssigkeit bewirkte. Dufour glaubte durch seine Versuche bewiesen zu haben, dass das Sieden mit der Verdunstung

---

[1] Ann. de chim. et de phys. LXXXII, p. 174, 1812. F. Marcet fand, dass siedendes Wasser in Glasgefässen durchschnittlich um 1,06° C., in Metallgefässen aber nur um 0,15 bis 0,20° C. wärmer ist als sein Dampf. (Compt. rend. XIV, p. 586, 1842; Pogg. Ann. LVI, S. 170.)

[2] Nach F. Donny ist die Cohäsion der Flüssigkeiten keine schwache, sondern eine verhältnissmässig starke Kraft, die nur an der Oberfläche eine Auflösung in Gas erlaubt. (Der Versuch mit der Adhäsionsscheibe beweis nichts gegen die starke Cohäsion, da die Scheibe mit ihrer Flüssigkeitsschicht sich nicht auf einmal, sondern nach und nach von der übrigen Flüssigkeit loslöst.) Wenn eine Flüssigkeit erwärmt wird, so scheiden sich an den wärmsten Stellen Gasblasen aus, an deren innerer Oberfläche die Flüssigkeit weiter verdampft; mit dem Erreichen der Siedetemperatur geht dieses innere Verdampfen in das Sieden über. (Pogg. Ann. LXVII, S. 562, 1846.) Grove behauptete ohne Weiteres, dass noch Niemand das Sieden von vollkommen reinem, luftfreiem Wasser beobachtet habe. (Pogg. Ann. CXIV, S. 481, 1861.)

[3] Compt. rend. LII, p. 986, 1861; LIII, p. 846; Pogg. Ann. CXXIV, S. 295, 1865.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

identisch ist und dass das erstere nur eintreten kann, wenn in der Flüssigkeit sich freie Oberflächen, Gasblasen etc. befinden oder durch Erschütterungen etc. gebildet werden[1]). Auch der Umgestaltung in feste Körper gegenüber zeigte das Gleichgewicht der Flüssigkeiten eine gewisse Stabilität, und Dufour vermochte Wassertropfen in der Plateau'schen Gleichgewichtslage bis — 20° unter Null abzukühlen, ohne dass die Erstarrung eintrat. Dufour kam zu der Ueberzeugung, dass das moleculare Gleichgewicht nicht von der Cohäsion und den Wärmebewegungen allein abhängig sein kann, sondern dass noch andere Ursachen mitwirken müssen, welche den Uebergang der Aggregatzustände bewirken. „Das Phänomen des Siedens, sagt er im Jahre 1865 [2]), umfasst offenbar eine doppelte Thatsache: Eine Dampfentwickelung in der ganzen Masse der Flüssigkeit, nicht eher möglich, als bis die Spannkraft dieses Dampfes dem Drucke gleich geworden ist; und das eigentliche seiner Natur nach dunkle Molecularphänomen, die Umänderung des flüssigen Zustandes in den gasigen. Durch die erste dieser Thatsachen hängt das Sieden vom Drucke ab, durch die zweite von Ursachen, welche das moleculare Gleichgewicht der Flüssigkeit zu stören vermögen. Die Ursachen sind vielleicht verschiedener Natur, und sehr wahrscheinlich ist der Contact gewisser fremder Körper, besonders der Gase, eine dieser störenden Actionen . . . Zwischen der Verzögerung des Siedens und der des Erstarrens bestehen unleugbare Analogien . . . Diese sind offenbar Thatsachen von gleicher Ordnung, welche von ähnlichen Ursachen abhängen . . . Wenn der Schwefel noch bei 30 oder 40° flüssig ist, so ist es nicht die Cohäsion, welche ihn am Gestehen hindert und noch in diesem instabilen Gleichgewichtszustande erhält, denn im Momente seines Erstarrens nähern sich seine Molecüle einander und bilden einen weit zäheren Körper als im flüssigen Zustande.“ Speciell mit dem Erstarren der Flüssigkeiten hatte sich Dufour auch in einer Arbeit vom Jahre 1861 [3]) beschäftigt. Er kam dabei zu der Ansicht, dass mannigfaltige zufällige Umstände dieses Erstarren des Wassers einleiten können, dass aber sicher dasselbe sich nur durch Berühren mit einem Eisstückchen hervorrufen lässt. Doch hatte sich Frankenheim [4]) schon im Jahre vorher noch bestimmter ausgesprochen. „Es giebt eigentlich, sagte dieser, wie Lowitz schon 1794 in einer trefflichen Abhandlung (Nov. comm. Petrop. XI, p. 271) nachgewiesen hat, nur eine Bedingung, welche

---

[1]) G. Krebs (Realgymnasialprofessor in Frankfurt am Main), der Dufour's Versuche im Wesentlichen wiederholte und bestätigte, constatirte, dass luftfreies, bis 140 oder 170° erhitztes Wasser bisweilen überhaupt nicht ins Kochen kam, sondern nur an der Oberfläche rasch verdunstete. (Pogg. Ann. CXXXVI, S. 148, 1869.)

[2]) Pogg. Ann. CXXIV, S. 315 bis 316.

[3]) Pogg. Ann. CXIV, S. 530, 1861.

[4]) Ibid. CXI, S. 1, 1860.

das Bestehen einer Flüssigkeit unterhalb ihres Gefrierpunktes vollständig verhindert, nämlich ihre Berührung mit einem Krystall gleicher Art. Ausserhalb dieser Berührungsfläche kann sich eine Flüssigkeit, an welchen Körper sie auch grenzen und wie sie auch bewegt werden mag, stets mehr oder weniger unter den Gefrierpunkt abkühlen, ohne zu erstarren. Sobald sich aber ein Krystall an einer Stelle gebildet hat, pflanzt sich die Krystallisation von Theilchen zu Theilchen so lange fort, bis kein Theil, dessen Temperatur unter dem Gefrierpunkt geblieben ist, noch flüssig ist.“ A. Mousson[1]) aber hatte 1858 darauf aufmerksam gemacht, dass jedenfalls das Erstarren des Wassers durch alle Umstände erschwert wird, die die Beweglichkeit der Theilchen desselben vermindern, und hatte dem entsprechend gefunden, dass das Wasser in Capillarröhren später gefriert, als bei vollkommen freier Oberfläche.



Wie der Zusammenhang zwischen den Veränderungen der Aggregatzustände und den Wärmebewegungen, so wurde auch der Zusammenhang zwischen den letzteren und der inneren mechanischen Arbeit der Körper eifrig und genau untersucht. P. Volpicelli behandelte 1871[2]) mit Erfolg das alte Problem von den Temperaturveränderungen, welche durch Aufblasen von Luftströmen gegen feste Körper verursacht werden. Um die Störungen durch die Ausdehnung der Gefässe, welche die thermometrischen Flüssigkeiten einschliessen, zu vermeiden, liess er die Luft aus einem Behälter, in welchem dieselbe auf vier Atmosphären zusammengepresst war, gegen eine Thermosäule strömen. Dabei ergab sich merkwürdiger Weise eine Temperaturerhöhung, wenn er die Thermosäule ganz nahe an die Ausflussöffnung der Luft rückte, dagegen eine Temperaturerniedrigung, wenn die Entfernung zwischen beiden eine mittlere war. Aehnliche nur weniger deutliche Resultate erhielt er bei Anwendung eines Blasebalgs. Volpicelli erklärte diese Erscheinung aus einer dreifachen Art von Ursachen des Temperaturzustandes der strömenden Gase, von denen in dem angedeuteten Falle bald die eine, bald die andere in ihrer Wirkung überwiegen kann. Der auf die feste Wand auftreffende, ursprünglich comprimirte Luftstrom leistet nämlich durch das Aufschlagen seiner Molecüle auf die Oberfläche des festen Körpers eine äussere Arbeit, durch das Eindringen seiner Molecüle in den festen Körper und die dabei eintretende Verdichtung eine innere Arbeit und endlich noch eine innere Arbeit durch seine Ausdehnung auf seinem Wege bis zu dem festen Körper. Die beiden ersten Ursachen bewirken eine Erhöhung, die dritte erzeugt eine Erniedrigung der Temperatur.

---

[1]) A. Mousson (geb. am 17. März 1805, Prof. d. Physik am Polytechnikum in Zürich), Pogg. Ann. CV, S. 161, 1858.

[2]) Compt. rend. LXXIII, p. 492. — Paolo Volpicelli, 8. Januar 1814 Rom — 14. April 1880 Rom, Prof. der mathematischen Physik an der Universität Rom.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Temperaturveränderungen hatte L. Dufour im Jahre 1872 [1]) auch bei der Diffusion von Gasen durch poröse Scheidewände bemerkt. Durch Beobachtung der Diffusion von Wasserstoff in Luft und von Luft in Kohlensäure constatirte er, dass stets eine Temperaturerhöhung eintritt auf der Seite der eintretenden Diffusion und eine Temperaturerniedrigung auf der Seite, wo das Gas aus der Wand kommt. Verursacht werden diese Veränderungen nach ihm von einer Verdichtung des Gases an der Oberfläche, wo der Eintritt stattfindet, und einer Ausdehnung desselben auf der Seite, wo der Austritt geschieht. Mit dieser Auffassung der Diffusion war auch das umgekehrte Problem gegeben, welches B. W. Feddersen noch im folgenden Jahre aufnahm [2]). Dieser zeigte, dass auch in einem homogenen Gase Diffusionserscheinungen eintreten, wenn nur eine in demselben befindliche poröse Scheidewand auf beiden Seiten auf verschiedenen Wärmegraden erhalten wird. Die Gase gingen dann immer von der kalten nach der warmen Seite hindurch. Feddersen bezeichnete die Erscheinung mit dem Namen Thermodiffusion. Er selbst aber erklärte seine Arbeit für veranlasst durch eine Abhandlung von C. Neumann [3]), nach der in einer unendlichen oder in sich zurücklaufenden Röhre, die mit irgend einem Gase gefüllt ist, wenn eine Partie des letzteren in einem abweichenden Dichtigkeitszustande sich befindet und wenn die beiden Enden der Röhre auf einer künstlich erzeugten Temperaturdifferenz erhalten werden, eine continuirliche Bewegung des Gases von der kalten nach der warmen Seite stattfindet. Die Angaben Feddersen's fanden später eine Bestätigung durch Osborne Reynolds [4]). Dieser constatirte bei der Transspiration von Wasserstoff

---

[1]) Arch. des sciences phys. et nat. 1872; Revue d. Fortschr. d. Naturw. 1874, S. 10.

[2]) Pogg. Ann. CXLVIII, S. 302, 1873.

[3]) Ber. über die Verhandl. der k. Sächs. Gesellsch. d. Wissensch., math.-physik. Classe 1872, S. 49. — C. Neumann, geboren am 7. Mai 1832, Professor der mathematischen Physik in Leipzig, Sohn von Fr. Neumann.

[4]) Experimental researches on thermal transpiration of gases through porous plates and on the laws of transpiration and impulsion, including an experimental proof that gas is not a continuous plenum, Proc. of the Roy. Soc. XXVIII, p. 304, 1879; Note on thermal transpiration, Proc. of the Roy. Soc. XXX, p. 300, 1880. O. Reynolds scheint die Abhandlung von Feddersen nicht gekannt zu haben, denn er sagt: „Zu den am besten bekannten Erscheinungen gehört der Unterschied der Geschwindigkeiten, mit denen verschiedene Gase durch dünne Canäle transspiriren, und die Differenz der Drucke, welche entsteht, wenn zwei verschiedene Gase, die anfangs unter gleichem Drucke standen, durch eine poröse Platte getrennt werden. Aber es scheint bisher noch kein Versuch gemacht worden zu sein, die Existenz einer nahe liegenden, analogen Erscheinung zu ermitteln, nämlich ob ein Temperaturunterschied an den beiden Seiten der Platte das Gas veranlassen würde, beim Fehlen jedes ursprünglichen Unterschiedes im Druck oder in der chemischen Constitution durch die Platte zu gehen; ebenso wenig ist mir bekannt, dass ein solches Resultat von einem Temperaturunterschiede vermuthet worden wäre."

durch eine poröse Platte, wenn der anfängliche Druck der atmosphärische war und beide Seiten auf einer constanten Temperaturdifferenz von 160° F. (52° und 212°) erhalten wurden, einen permanenten Druckunterschied auf beiden Seiten von 1 Zoll Quecksilber. Der höhere Druck zeigte sich dabei auf der wärmeren Seite. Er verglich danach die zusammengehörigen Druck- und Temperaturdifferenzen für verschiedene Gase und verschiedene Platten und kam dadurch zu dem allgemeinen Gesetz, dass die thermischen Druckdifferenzen unabhängig sind von der Dicke der Platten und nur abhängig von der Weite ihrer Poren und der Dichte oder der Entfernung der Molecüle der Gase. Hierin aber fand er einen sicheren Beweis für die moleculare Structur der Gase[1]). In besonderer Weise wandte Charles Soret[2]) die Vorstellung von der Wärmediffusion auch auf Flüssigkeiten an. Er erhielt die Enden einer verticalen, cylindrischen Röhre, die mit einer homogenen Salzlösung (Kalisalpeter oder Kochsalz) gefüllt war, auf verschiedenen Temperaturen (78° am oberen und 15° bis 18° am unteren Ende) und beobachtete, dass die Salzlösung in dem kalten auf Kosten des warmen Theiles sich zu concentriren strebte und dass diese Wirkung schnell mit der ursprünglichen Concentration wuchs. Auch hier muss man die Diffusion als eine besondere Wirkung der thermischen Molecularbewegungen ansehen; denn wollte man dieselbe nur durch die bekannte Erhöhung der Lösungsfähigkeit der Salze mit dem Wachsen der Temperatur erklären, so würde man hierbei gerade die entgegengesetzte Richtung der Salzströmung vermuthen müssen, als sie in Wirklichkeit eintritt[3]).

Eine eigenthümliche Anomalie in der Verwandlung von äusserer und innerer Arbeit hatte Joule[4]) 1857 am Kautschuk entdeckt. Während Metalldrähte sich beim Ausziehen abkühlen und beim Zusammenziehen erwärmen, verhalten Stränge von vulcanisirtem Kautschuk sich gerade umgekehrt. Govi und Pierre hatten seine Angaben vollkommen bestätigt. E. Villari[5]) bemühte sich nun, diese auffallende

---

[1]) „Dieses Gesetz erhebt sich zu nichts Geringerem, als zu einem absoluten experimentellen Beweise, dass das Gas eine heterogene Structur besitzt und aus einzelnen Molecülen besteht, dass es nicht ein continuirliches Plenum ist, von dem jeder Theil, in den es zerlegt werden könnte, dieselben Eigenschaften besitzt, wie das Ganze."

[2]) Arch. des scienc. phys. et nat. (3) I, p. 48, 1879; (3) IV, p. 209, 1880. — Ch. Soret, Professor der Physik in Genf.

[3]) Diese Beobachtungen waren aber von C. Ludwig (geb. am 29. Decbr. 1816, Professor der Physiologie in Leipzig) schon im Jahre 1856 (Wiener Sitzungsberichte XX, S. 539) fast in derselben Weise wie von Soret gemacht worden. Ludwig hatte zwei Retorten, jede mit 8,98 procentiger Lösung schwefelsauren Natriums angefüllt, mit einander verbunden und die eine $A$ in kochendes Wasser, die andere $B$ in schmelzendes Eis gestellt. Nach sieben Mal 24 Stunden enthielt dann die wärmere $A$ nur noch eine 4,31 procentige Lösung, während in der kälteren $B$ das Salz auskrystallisirte.

[4]) Phil. Mag. (4) XIV, p. 226; XV, p. 538.

[5]) Nuovo Cimento (2) I, p. 301; Pogg. Ann. CXLIII, S. 274, 1871.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Erscheinung zu erklären. Er hängte eine Thermosäule an seidenen Fäden so auf, dass sie leicht auf den eben ausgedehnten oder eben contrahirten Kautschukstreifen herabgelassen werden konnte. Auf diese Weise constatirte er, dass die Temperaturerhöhung beim Ausziehen des Kautschuks absolut genommen grösser ist als die Temperaturerniedrigung beim Zusammenziehen und dass danach bei mehrmaligen hinter einander folgenden Deformirungen immer ein starker Ueberschuss von Wärme bleibt. Dieser Ueberschuss deutet darauf hin, dass ein Theil der äusseren Arbeit in innere und danach in Wärme umgesetzt wird. Die Temperaturveränderungen bei der Ausdehnung der Gase und bei der des Kautschuks haben also eine verschiedene Quelle; bei den ersteren entsteht die Abkühlung durch eine Leistung äusserer Arbeit, bei dem letzteren die Erwärmung durch eine Consumption von innerer Arbeit. Diese Erklärung der Wärmeentwickelung, so sagt Villari, findet eine glänzende Bestätigung durch gewisse Versuche von Warburg[1]. „Derselbe beweist, dass die starren Körper sich erwärmen, wenn sie einen Ton geben oder fortpflanzen, weil die anfänglich lebendige Kraft in innere Arbeit und in Wärme umgewandelt wird, wodurch die Körper desto mehr Wärme entwickeln, als sie die ihnen eingeprägte oder von ihnen fortgepflanzte Schallbewegung schneller auslöschen. Das Kautschuk ist unter den untersuchten Körpern derjenige, welcher sich am meisten erwärmt, weil er die Schallvibrationen am schnellsten auslöscht. Die Analogie zwischen Warburg's Beobachtungen und den meinigen ist vollständig, und die Erklärungen stimmen mit den vorher von mir gegebenen Daten. Daraus können wir überdies den Schluss ziehen, dass auch diejenigen Körper, welche sich beim Ausziehen abkühlen und beim Zusammenziehen erwärmen, sich bei einer Reihe wiederholter, rascher Anziehungen erwärmen müssen, weil auch in solchen Körpern ein Theil der verwendeten Kraft sich in innere Arbeit und darauf in Wärme verwandeln muss."

Eine directe Umsetzung von Massenbewegung in Aetherbewegung glaubten Tait und B. Stewart[2] im Jahre 1865 constatiren zu können. Sie versetzten leichte Aluminiumscheiben in einem so viel wie möglich luftleer gemachten Raume durch ein Räderwerk in Rotation und beobachteten dabei eine Wärmeentwickelung, die von dem Grade der Verdünnung der Luft jedenfalls unabhängig und aus keiner anderen Ursache als jener Umsetzung erklärbar schien. Im nächsten Jahre zeigten die beiden Physiker[3], dass die betreffende Erwärmung nicht abgeleitet werden dürfe aus dem inducirenden Einfluss des Erdmagnetismus auf die Scheibe und auch nicht von der Zapfenreibung.

---

[1] Erwärmung fester Körper durch das Tönen, Pogg. Ann. CXXXVII, S. 632, 1869.

[2] Proc. Roy. Soc. XIV, p. 339, 1865; Phil. Mag. (4) XXX, p. 314.

[3] Proc. Roy. Soc. XV, p. 290, 1866; Phil. Mag. (4) XXXIII, p. 224; Pogg. Ann. CXXXVI, S. 165.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Dagegen hielten sie nicht für ausgeschlossen, wenn auch durch ihre Versuche zum mindesten unwahrscheinlich gemacht, dass durch die Unvollkommenheit des Bewegungsapparates die Scheibe in Schwingungen versetzt worden sei, die sich an der Viscosität des Metalls nach und nach erschöpft und in Wärme umgesetzt hätten [1]. O. E. Meyer hatte nämlich schon auf Unregelmässigkeiten in den betreffenden Bewegungen aufmerksam gemacht und aus den Abweichungen der Scheibe, die Stewart und Tait nur einer etwas schiefen Lage gegen ihre Achse zuschrieben, auf ein Schlottern derselben und eine hierdurch verursachte Umsetzung der mechanischen Bewegung in Wärmebewegung geschlossen [2]. Stewart und Tait griffen nach einigen Jahren [3] noch einmal mit verbesserten Apparaten auf diese Versuche zurück, bei denen sie allerdings verschiedene Ursachen für die entwickelte Wärme, aber doch wieder einen Rest von Wärme constatirten, der noch immer einer solchen Erklärung, wie sie früher gegeben, bedurfte.

Ein Problem, das direct von der Auffassung der Aggregatzustände abhing und das durch die neue Wärmetheorie ein ganz anderes Ansehen erhalten musste, war auch die Frage nach der Wärmeleitungsfähigkeit der Körper. So lange man die Aggregatzustände für mehr oder weniger unveränderliche Daseinsformen der einzelnen Stoffe ansah und so lange man auch die Wärme selbst als eine elementare, von anderen nicht abhängige Materie betrachtete, so lange durfte man wohl annehmen, dass dieser Stoff nur in festen Körpern, nicht aber in flüssigen und gasförmigen sich frei verbreiten könne. So wie man aber die Wärme als eine Bewegungsart der kleinsten Theilchen auch der ponderablen Materie anerkannte, so musste man auch die Möglichkeit einer Uebertragung dieser Bewegung von Theil zu Theil für alle Aggregatzustände ins Auge fassen. Für feste Stoffe war die Wärmeleitungsfähigkeit nach wie vor gesichert, für gasförmige Stoffe war nach der neueren Gastheorie diese Nothwendigkeit eines Ausgleichs der Wärmebewegung innerhalb eines Gases gar nicht zu übersehen, danach handelte es sich für die Flüssigkeiten, deren Constitution auch nach der neuen Theorie noch keineswegs klar erschien, zuerst darum, experimentell ihre Leitungsfähigkeit für Wärme zu untersuchen.

Die letzten Versuche über die Leitungsfähigkeit der Flüssigkeiten während des Herrschens der alten Wärmetheorie hatte C. Despretz im Jahre 1839 veröffentlicht [4]; sie bezogen sich nur auf das Wasser. Er führte in einen mit Wasser gefüllten, hölzernen Cylinder zur Beobachtung der Temperatur, von der Seite her, sieben Thermometer wasserdicht so ein, dass die Kugeln derselben in der Achse des Cylinders lagen

---

[1] Pogg. Ann. CXXXVI, S. 166.

[2] Pogg. Ann. CXXVII, S. 381; CXXXV, S. 285.

[3] Proc. Roy. Soc. XXI, p. 309, 1870.

[4] Sur la propagation de la chaleur dans les liquides, Ann. de chim. et de phys. (2) LXXI, p. 206; Pogg. Ann. XLVI, S. 340.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

und die Röhren aus demselben hervorsahen. Die Erwärmung geschah durch einen auf das Wasser gesetzten Kupferkessel, durch den heisses Wasser von bestimmter Temperatur strömte. Im stationären Zustande, der allerdings erst nach 36 Stunden eintrat, zeigten dann die Thermometer dieselbe Temperaturcurve, wie sie bei festen Körpern beobachtet wurde, nur dass bei Flüssigkeiten der Abfall derselben ein viel schnellerer war. Despretz schloss daraus, dass die Flüssigkeiten die Wärme genau in derselben Art wie feste Körper, nur in viel geringerem Maasse, leiten. Erst 30 Jahre später, lange nach dem Siege der neuen Wärmetheorie, um das Jahr 1868, unternahm A. Paalzow[1]) neue Messungen der Leitungsfähigkeiten verschiedener Flüssigkeiten, die aber ganz nach der Methode von Despretz ausgeführt wurden. Er war dabei auch weniger durch thermische Interessen als vielmehr durch den Gedanken geleitet, das Leitungsvermögen für Elektricität und Wärme mit einander zu vergleichen. Für diesen Zweck genügten ihm die beiden Reihen:

Leitungsvermögen für

| Wärme: | Elektricität: |
|---|---|
| Quecksilber | Quecksilber |
| Wasser | Schwefelsäure |
| Kupfervitriol | Kochsalzlösung |
| Schwefelsäure | Zinkvitriol |
| Zinkvitriol | Kupfervitriol |
| Kochsalzlösung. | Wasser. |

Von dieser Zeit an aber begann man sich doch eifriger mit jenem Probleme zu beschäftigen. Guthrie[2]) hatte noch um dieselbe Zeit wie Paalzow die verhältnissmässigen Widerstände gemessen, welche dünne Schichten verschiedener Flüssigkeiten dem Durchgange der Wärme entgegensetzen, und danach das Leitungsvermögen der Flüssigkeiten beurtheilt. Seine Resultate stimmten aber mit denen Paalzow's schlecht überein; nur so viel schien nach ihnen sicher, dass die Leitungsfähigkeit mit der Temperatur steigt. Absolute Zahlen für die Leitungsfähigkeit theilte zuerst Lundquist auch noch im Jahre 1869[3]) mit. Nach einer Methode, die Ångström schon 1861 für feste Körper benutzt hatte[4]), erwärmte und kühlte er die Flüssigkeiten in regelmässigen Perioden, beobachtete die Temperaturen an zwei Punkten der Achse des die Flüssigkeiten enthaltenden, cylindrischen Gefässes und berechnete danach das

[1]) Pogg. Ann. CXXXIV, S. 618. — A. Paalzow, geboren am 5. August 1823, Lehrer der Physik in Berlin.

[2]) Phil. Trans. 1869, p. 637. — Frederick Guthrie, 1833 bis 1886, zuletzt Professor of Physics in the Royal School of Mines, London.

[3]) Undersökning af några vätskors lednings förmåga for värme, Upsala Universitets årsskrift, p. 1, 1869.

[4]) Pogg. Ann. CXIV, S. 513; aus Oefversigt af K. Vet. Acad. Förhandl. 1861.

absolute Wärmeleitungsvermögen. Er fand so unter anderen, wenn $l$ dieses Leitungsvermögen, $s$ das specifische Gewicht und $t$ die Temperatur bezeichnen:

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

| | $l$ | $s$ | $t$ |
|---|---|---|---|
| für Wasser . . . . . | 0,0933 | 1,000 | 40,8° |
| für Zinkvitriollösung . | 0,0964 | 1,242 | 44,1° |
| für Kochsalzlösung . . | 0,0895 | 1,178 | 43,9° [1]). |

Hiervon abweichende Resultate erhielt fünf Jahre später A. Winkelmann[2]) nach einer Methode, die Steffan schon zur Messung der Leitungsfähigkeit der Gase angewandt und die wir noch beschreiben werden, nämlich:

| | $l$ | | |
|---|---|---|---|
| Wasser . . . . . . . . | 0,0924 | | $t = 0^0$ bis $20^0$. |
| Kochsalzlösung . . . . | 0,1605 | (specif. Gew. 1,110) | |
| Chlorkaliumlösung . . . | 0,1147 | (20 Proc.) | |
| Alkohol . . . . . . . . | 0,0904 | | |
| Schwefelkohlenstoff . . . | 0,1202 | | |
| Glycerin . . . . . . . . | 0,0449 | | |

Noch andere Werthe endlich gab H. Fr. Weber im Jahre 1879[3]) für das Leitungsvermögen der Flüssigkeiten, die er abermals auf eine neue Art gemessen hatte. Er kühlte eine nur einige Millimeter dicke Schicht der betreffenden Flüssigkeit, die sich zwischen zwei horizontalen Kupferplatten befand und die die mittlere Zimmertemperatur hatte, an der unteren Fläche bis 0° ab und beobachtete den Gang der Temperatur an der oberen Fläche. Aus zahlreichen Beobachtungen berechnete er dann die folgende Tabelle, in welcher $\gamma$ die specifische Wärme der Volumeneinheit und $e$ die von Weber so genannte Temperaturleitungsfähigkeit der betreffenden Substanzen bezeichnen:

| | $l$ | $\gamma$ | $e = \frac{l}{\gamma}$ |
|---|---|---|---|
| Wasser . . . . . . . . . | 0,0745 | 1,000 | 0,0745 |
| Kupfervitriollösung . . . | 0,0710 | 0,984 | 0,0722 |
| Zinkvitriollösung in wachsender Concentration . . | 0,0711 bis 0,0691 | 0,976 bis 0,962 | 0,0729 bis 0,0718 |
| Kochsalzlösung . . . . . | 0,0692 | 0,942 | 0,0735 |
| Glycerin . . . . . . . . | 0,0402 | 0,738 | 0,0545 |

[1]) Als Definition des Leitungsvermögens gilt die von Fourier gegebene und S. 217 d. B. mitgetheilte; die Einheiten sind Gramm, Centimeter, Minute und 1° C.

[2]) Pogg. Ann. CLIII, S. 481, 1874. — A. Winkelmann, Professor der Physik in Jena.

[3]) Wiedemann's Ann. X, S. 103, 304 und 472, 1879. — H. Fr. Weber, Professor in Zürich.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

| | $l$ | $\gamma$ | $e = \frac{l}{\gamma}$ |
|---|---|---|---|
| Alkohol . . . . . . . . . | 0,0292 | 0,450 | 0,0649 |
| Schwefelkohlenstoff . . . | 0,0250 | 0,325 | 0,0769 |
| Aether . . . . . . . . . | 0,0243 | 0,378 | 0,0643 |
| Benzin . . . . . . . . . | 0,0200 | 0,270 | 0,0741 [1]) |

Weber zog aus diesen Resultaten den Schluss, dass die Temperaturleitungsfähigkeit $e$ wohl nahezu als eine Constante anzusehen sei, indem nur bei so ausserordentlich zähen Flüssigkeiten, wie Glycerin, dieselbe um ein Weniges abweiche [2]). Die Wärmeleitungsfähigkeit würde sich danach durch die Formel $l = e . \gamma$ oder $l = e . s . c$ ausdrücken lassen und würde also merkwürdiger Weise nur wenig von der inneren Reibung abhängig, wohl aber der specifischen Wärme der Volumeneinheit und damit dem Wärmevorrath in derselben direct proportional sein. In Bezug auf die Abhängigkeit von der Temperatur zeigten weitere Versuche, dass das Wärmeleitungsvermögen jedenfalls mit steigender Temperatur und zwar wahrscheinlich in linearer Weise wächst.

Uebrigens scheint bei der Wärmeleitung der Flüssigkeiten das Quecksilber eine Einzelstellung einzunehmen, die dasselbe vollständig aus der Reihe der übrigen Flüssigkeiten heraushebt; denn es fand sich für dieses nach ganz derselben Methode, wie sie früher bei den durchsichtigen, nicht metallischen Flüssigkeiten angewandt wurde, die Temperaturleitungsfähigkeit $e = 2{,}00$, also circa 30 Mal so gross als bei jenen Flüssigkeiten. „Dieses Resultat, sagt Weber, drängt zu der Annahme, dass der Vorgang bei der Wärmeleitung in metallischen Flüssigkeiten von wesentlich anderen Momenten abhängt als in nicht metallischen. Während in den letzteren die Wärmeleitung in einer einfachen Ueber-

[1]) Wiedem. Ann. X, S. 315.

[2]) Auch W. Beetz, der um diese Zeit das relative Leitungsvermögen mehrerer Flüssigkeiten bestimmte, fand, dass dasselbe mit der leichteren Beweglichkeit der Theilchen oder mit der Abnahme der Zähigkeit zunimmt, womit auch nach ihm das Wachsen der Leitungsfähigkeit mit der Temperatur in Uebereinstimmung ist. (Wiedem. Ann. VII, S. 435.) C. Chree (Proc. of the Roy. Soc. XLII, p. 300, 1887) aber hat sogar bei neuen Versuchen Weber's Satz, dass die Wärmeleitungsfähigkeit dem Product aus der Dichte und der specifischen Wärme proportional ist, direct bestätigt. Vielleicht gehören hierher auch die merkwürdigen Beobachtungen Herbert Tomlinson's, nach denen die Wärmeleitungsfähigkeit eines Eisenstabes abnimmt, wenn er in der Längsrichtung, aber zunimmt, wenn er in der Querrichtung magnetisirt wird. (Proc. Roy. Soc. XXVII, p. 109, 1878.) Indessen waren Naccari und Bellati schon vorher zu dem negativen Resultate gekommen, dass die Magnetisirung des Eisens keinen Einfluss auf dessen Wärmeleitungsfähigkeit ausübt. (Cimento (3) I, p. 72 und 107, Beiblätter zu Wiedem. Ann. I, S. 475.)

tragung der lebendigen Kraft der bewegten ponderabeln Molecüle von Schicht zu Schicht zu bestehen scheint, lässt das für Quecksilber gefundene, ganz abweichende Resultat vermuthen, dass in der Wärmeleitung innerhalb der metallischen Substanzen die von Schicht zu Schicht stattfindende innere Strahlung das wesentliche Element ist, und dass die zwischen je zwei Nachbarschichten eintretende Uebertragung der lebendigen Kraft der bewegten ponderablen Molecüle nur eine secundäre Bedeutung hat. Damit fällt aber ein ganz neues Licht auf die bisher constatirte, jedoch vollkommen unbegriffene Analogie zwischen dem Wärmeleitungsvermögen und dem elektrischen Leitungsvermögen der Metalle. Es eröffnet sich jetzt die Aussicht, dass der parallele Verlauf beider Leitungsvermögen einer Erklärung zugänglich gemacht werden kann"[1]). Weber betont ausdrücklich, dass, so viele Male auch die Wärmeleitung der Flüssigkeiten früher untersucht worden, eben so viele verschiedene einander total widersprechende Resultate gewonnen worden seien, er constatirt auch, dass die von ihm erhaltenen wieder von allen früheren abweichen, versucht aber zu zeigen, dass bei richtiger Correction diese früheren doch mit seinen Werthen zur Uebereinstimmung zu bringen sind. Indessen hat auch Weber damit die Sache nicht zu einem sicheren ihm günstigen Entscheid bringen können, und Winkelmann besonders hat seine Resultate denen von Weber gegenüber in mehreren Abhandlungen aufrecht erhalten[2]).

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Günstiger als bei den Flüssigkeiten lagen theoretisch wenigstens die Verhältnisse bei den Gasen, wo die Wirkung der unfassbaren Molecularkräfte ausgeschlossen war und die neuere Gastheorie einfache und klare Verhältnisse geschaffen hatte. Nachdem Clausius die translatorische Geschwindigkeit der Gasmolecüle und Maxwell die Anzahl der Zusammenstösse zwischen diesen Molecülen in einer gegebenen Zeit durch Formeln zu fassen gewusst, konnte es nicht mehr schwer sein, auch die Geschwindigkeit des Ausgleichs verschiedener Bewegungen in den Molecularsystemen oder die Leitungsfähigkeit der Gase für die Wärme zu berechnen. Maxwell in seinen berühmten Abhandlungen von 1860[3]) und Clausius in einer Arbeit von 1862[4]), in welcher er die mechanische Gastheorie gegen Jochmann vertheidigte, hatten denn auch direct für die Wärmeleitung $l$ der Gase Formeln abgeleitet, die beide sich durch $l = a \,.\, \eta \,.\, c_v$ darstellen liessen und nur in dem constanten Factor $a$ verschieden waren. Da der Coëfficient der inneren Reibung $\eta$, wie auch die specifische Wärme $c_v$ bei constantem Volumen anderweitig zu bestimmen waren, so konnte man die Wärmeleitungsfähigkeit der Gase ohne Weiteres berechnen. In der That vermochte Maxwell direct anzugeben,

---

[1]) Wiedem. Ann. X, S. 494.

[2]) Siehe die Polemik zwischen Winkelmann u. Weber in Wiedem. Ann. X, S. 668; XI, S. 352 u. 735.

[3]) Phil. Mag. (4) XX, p. 31, 1860.

[4]) Pogg. Ann. CXV, S. 1, 1862.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

dass die Leitungsfähigkeit der atmosphärischen Luft 3500 Mal kleiner als die des Eisens, und Clausius ebenso, dass sie 1400 Mal kleiner als die des Bleies sein müsse. Nehmen wir die specifische Wärme, was allerdings wohl nicht in voller Strenge richtig, für jedes Gas als eine Constante an, so ist die Wärmeleitungsfähigkeit nur noch mit dem Coëfficienten der inneren Reibung veränderlich und mit diesem vom Druck unabhängig, der Quadratwurzel aus der Temperatur aber direct proportional. Clausius sprach diese Sätze auch als gültig aus und fügte noch hinzu, dass die leichtesten Gase wie die grössten Reibungscoëfficienten auch die grössten Wärmeleitungsfähigkeiten zeigen müssten. Maxwell aber, der, wie schon erwähnt, die Proportionalität der inneren Reibung nicht mit der Quadratwurzel, sondern mit der Temperatur selbst annehmen zu müssen glaubte, fand dasselbe ebenso für die Wärmeleitungsfähigkeit nöthig und arbeitete danach wie seine ganze Theorie der Gase auch die der Wärmeleitungsfähigkeit unter der neuen Voraussetzung um, dass zwischen den Molecülen eine abstossende Kraft umgekehrt proportional der fünften Potenz der Entfernung wirke [1]). Indessen zeigten sich doch die danach resultirenden Werthe gerade ebenso stark von den experimentell erhaltenen Werthen abweichend als die aus den Formeln von Clausius abgeleiteten [2]). Die relativen Werthe der Wärmeleitungsfähigkeiten der Gase, die man aus den Formeln von Clausius und Maxwell berechnete, stimmten allerdings mit den direct gemessenen relativen Werthen, wenigstens für die einfachen Gase, genügend überein, was man mit Recht als einen Triumph der kinetischen Theorie der Gase betrachtete; den experimentell erhaltenen, absoluten Werthen gegenüber aber erwiesen sich die Maxwell'schen Werthe fast um gerade so viel zu gross als die Clausius'schen zu klein erschienen.

Experimentell constatirt wurde die Wärmeleitungsfähigkeit der Gase zum ersten Male durch Magnus im Jahre 1860 [3]), der aber auch

[1]) Phil. Mag. (4) XXXV, p. 214, 1868.

[2]) Nach Clausius folgt die Formel $l = \frac{5}{4} \eta c$, nach Maxwell $l = \frac{5}{3} \eta c$; O. E. Meyer (kinet. Theor. d. Gase, S. 331) leitete später wieder aus der älteren Theorie von Clausius und Maxwell und unter Zugrundelegung des Maxwell'schen Vertheilungsgesetzes der Geschwindigkeiten die Formel $l = 1{,}53\, \eta c$ ab.

[3]) Pogg. Ann. CXII, S. 497, 1861 (gel. in der Berliner Akad. am 30. Juli 1860 und am 7. Februar 1861). Nach seiner eigenen Aussage ist Magnus zu seinen Untersuchungen durch die Beobachtung Grove's (Phil. Mag. (3) XXVII, p. 445 u. XXXV, p. 114, 1845 u. 1849; auch Pogg. Ann. LXXVIII, S. 366) gekommen, dass ein Platindraht durch den galvanischen Strom weniger stark glüht, wenn er von Wasserstoff umgeben ist, als wenn er sich in atmosphärischer Luft oder einer anderen Gasart befindet. Poggendorff und Clausius hatten auch bereits bemerkt, dass diese Erscheinungen mit den merkwürdigen Beobachtungen Dulong's und Petit's (Siehe S. 220 d. Bds.) bei Abkühlung der Körper in verschiedenen Gasarten in eine Classe gehörten. Die ausgezeichnete Wärmeleitungsfähigkeit des Wasserstoffs wurde natürlich als ein Beweis für die metallische Natur desselben angesehen, und man hatte danach auch nicht übel Lust, dem Wasserstoff unter den Gasen die Wärmeleitungsfähigkeit allein zu reserviren.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

nur für den Wasserstoff eine solche sicher nachweisen konnte. Erwärmt man ein überall geschlossenes Hohlgefäss gleichmässig von aussen, so wird ein in der Mitte desselben befindliches Thermometer durch Strahlung, wie auch durch die Leitung der in dem Gefässe befindlichen Luftart erwärmt werden; Strömungen sind bei der gleichmässigen Erwärmung des Gefässes ausgeschlossen. Da keine Gasart vollständig diatherman ist, so wird jedes in dem Gefässe befindliche Gas die Strahlung gegen die im leeren Raume stattfindende schwächen, und nur durch eine Wärmeleitung des betreffenden Gases könnte diese Schwächung vermindert, ganz ausgeglichen oder auch in eine Verstärkung der Temperaturerhöhung umgekehrt werden. Sicher aber wird man beim Eintreten des letzteren Falles auf eine Wärmeleitungsfähigkeit des Gases schliessen können. Magnus beobachtete nun in der Mitte des Gefässes, wenn er dasselbe mit verschiedenen Gasen füllte und dann in immer gleicher Weise von aussen erwärmte, die folgenden relativen Temperaturerhöhungen:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Leerer Raum . . . | 100 | Grubengas . . . . | 80,3 |
| Atmosphärische Luft. | 82,0 | Oelbildendes Gas. . | 76,9 |
| **Wasserstoff** . . . | **111,1** | Ammoniak . . . . | 69,2 |
| Kohlensäure . . . . | 70,0 | Cyan . . . . . . | 75,2 |
| Kohlenoxydgas . . . | 81,2 | Schweflige Säure. . | 66,6 [1]) |
| Stickoxydul . . . . | 75,2 | | |

Damit war für Wasserstoff eine Wärmeleitungsfähigkeit sicher nachgewiesen, für die übrigen Gase hielt Magnus ein Ueberwiegen der Athermanität über eine etwaige Leitungsfähigkeit für wahrscheinlich, womit auch übereinstimmte, dass jene Temperaturen sich mit der Verdünnung der Gase erhöhten. Narr ging 1871 [2]) direct auf das von Dulong und Petit bei ihren Erkaltungsversuchen angewandte Verfahren zurück und berechnete aus der Abkühlungszeit eines mit erwärmtem Leinöl gefüllten Gefässes im leeren Raume, in Wasserstoff, atmosphärischer Luft, Stickstoff und Kohlensäure die relativen Wärmeleitungsfähigkeiten der Gase. Stefan aber gelang es 1872 [3]) durch eine Vervollkommnung dieses Verfahrens, auch die absoluten Werthe der Wärmeleitungsconstanten zu bestimmen. Nach mehrfachen Versuchen erhielt er befriedigende Resultate

[1]) Pogg. Ann. CXII, S. 511.

[2]) Pogg. Ann. CXLII, S. 123, 1871. — F. Narr, geb. am 16. August 1844, Professor der Physik in München.

[3]) Wiener Sitzungsber. LXV, 2. Abth., S. 45, 1872; LXXII, 2. Abth., S. 69, 1876. Stefan sagt von der Uebereinstimmung der gefundenen Wärmeleitungsfähigkeiten mit der Theorie: „Wenige von den physikalischen Theorien haben solche glänzend bewährte Vorherbestimmungen aufzuweisen, und muss nun wohl die dynamische Theorie der Gase als eine der am besten begründeten physikalischen Theorien angesehen werden. Auch ein anderes Gesetz, das durch diese Theorie gegeben wurde, nämlich die Unabhängigkeit des Leitungsvermögens der Luft von ihrer Dichte, haben die Versuche in ganz unzweifelhafter Weise als richtig bewiesen.“ — J. Stefan, geb. am 24. März 1835, Professor der Physik an der Universität Wien.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

dadurch, dass er doppelwandige Metallgefässe construirte, zwischen deren Doppelwände er die zu untersuchenden Gase füllte und deren inneren Behälter er als Luftthermometer benutzte. Bei jedem Versuche wird der Apparat erst in allen seinen Theilen auf eine gleichmässige Temperatur, die Zimmertemperatur, gebracht, dann in ein Gefäss mit Eis und Schnee getaucht, und danach wird der Gang des Thermometers beobachtet. Da nach Stefan hierbei der Einfluss der Strahlung unmerklich ist, so hängt die von der inneren Wand ausgehende Wärmemenge nur von der Temperaturdifferenz, der Entfernung und der Grösse der Wände, sowie dem Wärmeleitungsvermögen des den Zwischenraum erfüllenden Gases ab, und dieses Vermögen lässt sich danach berechnen. Stefan fand so für das absolute Leitungsvermögen der Luft die Zahl 0,0000558 und für die relativen Leitungsvermögen der anderen Gase die Werthe:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Luft | 1,000 | Kohlenoxyd | 0,981 |
| Kohlensäure | 0,642 | Sauerstoff | 1,018 |
| Stickoxyd | 0,665 | Sumpfgas | 1,372 |
| Oelbildendes Gas | 0,752 | Wasserstoff | 6,718 |

Mit ähnlichen Apparaten und nach ähnlichen Verfahren sind dann alle weiteren Messungen angestellt; Winkelmann[1]) erhielt so mit den Stefan'schen recht gut übereinstimmende, und Kundt und Warburg[2]) fanden nur wenig abweichende Werthe.

O. E. Mayer stellte die beobachteten Werthe mit denen, die er aus einer von ihm abgeleiteten Formel $l = 1,53 \,.\, \eta \,.\, c$ berechnete, in der nebenstehenden Tabelle (S. 675) zusammen[3]). Die Tabelle zeigt, dass die berechneten Grössen mit den beobachteten bei allen Gasen, deren Molecüle zweiatomig sind, genügend übereinstimmen, dass sie aber für alle Gase mit mehr als zweiatomigen Molecülen sämmtlich zu gross ausfallen. Hier setzte nun Boltzmann mit einer überaus wichtigen Idee ein, indem er die Möglichkeit und den Einfluss intramolecularer Bewegungen, d. h. Bewegungen, welche die Atome unabhängig von der Bewegung des Molecüls in demselben ausführen, in Rechnung zog. Boltzmann hatte direct nach der Arbeit Stefan's im Jahre 1872[4]) darauf aufmerksam gemacht, dass das

---

[1]) Pogg. Ann. CLVI, S. 497, 1875; CLVII, S. 497, 1876; CLIX, S. 177, 1876. Die beiden letzten Arbeiten hatten vor Allem die Untersuchung der Abhängigkeit der Leitungsfähigkeit von der Temperatur im Auge. In der ersten Abhandlung fand Winkelmann noch, dass die Resultate ganz mit dem Temperaturgesetz Maxwell's stimmten (Pogg. Ann. CLVII, S. 549); in der zweiten aber kam er, bei Berücksichtigung der Veränderlichkeit der specifischen Wärme mit der Temperatur, zu dem Resultat, dass der Temperaturcoëfficient der Wärmeleitung dem Resultate Maxwell's ebenso wenig wie jenem von Clausius folgt. (Pogg. Ann. LXIX, S. 181.)

[2]) Pogg. Ann. CLVI, S. 177, 1875.

[3]) Kinetische Theorie der Gase, Breslau 1877, S. 194.

[4]) Wiener Sitzungsber. LXVI, 2. Abth., S. 333, 1872. Boltzmann sagt an dieser Stelle: „Doch scheint mir dies (d. h. eine Berichtigung der Maxwell'-

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Absolute Werthe der Leistungsfähigkeit:

| | Berechnet | Beobachtet | Beobachter |
|---|---|---|---|
| Atmosphärische Luft . . . . | 0,0000492 | 0,0000480 | Kundt u. Warburg |
| | | 0,0000525 | Winkelmann |
| | | 0,0000558 | Stefan |
| Wasserstoff (H H) . . . . . . | 0,0003497 | 0,0003324 | Winkelmann |
| Kohlenoxyd (C O) . . . . . . | 0,0000490 | 0,0000510 | „ |
| Stickstoff (N N) . . . . . . . | 0,0000491 | 0,0000524 | „ |
| Sauerstoff (O O) . . . . . . | 0,0000502 | 0,0000563 | „ |
| Kohlensäure ($CO_2$) . . . . . | 0,0000407 | 0,0000317 | „ |
| Stickoxydul ($N_2O$) . . . . . | 0,0000425 | 0,0000363 | „ |
| Sumpfgas ($CH_4$) . . . . . . | 0,0000829 | 0,0000647 | „ |
| Oelbildendes Gas ($C_2H_2$) . . . | 0,0000542 | 0,0000414 | „ |

Wärmeleitungsvermögen der Gase auf theoretischem Wege überhaupt nicht numerisch exact zu berechnen sei, weil man aus der Gastheorie ohne nähere Kenntniss der inneren Beschaffenheit der Molecüle nicht bestimmen könne, in welcher Weise sich die intramoleculare Bewegung der Molecüle von Molecül zu Molecül fortpflanze. Maxwell, der auf die intramoleculare Bewegung bei seiner Berechnung der Wärmeleitung keine Rücksicht nehme, setze damit stillschweigend voraus, dass der Theil der Wärmebewegung, welcher auf die Bestandtheile der Molecüle, auf die Atome übergehe, sich ebenso schnell fortpflanze, als die Molecularbewegung selbst; diese Voraussetzung liege nahe, sei aber trotzdem nicht wahrscheinlich, und die zu grossen Werthe, welche Maxwell erhalte, wären ein Zeichen dafür, dass die intramoleculare Bewegung nur in geringerem Maasse an der Wärmeleitung betheiligt sei, als es nach jener Annahme der Fall sein müsste.. Boltzmann kehrte darum einige Jahre später [1]) das Problem um und berechnete nun aus den bis dahin bekannt gewordenen Messungen der Wärmeleitungsfähigkeit der Gase die ver-

---

schen Formel für die Wärmeleitung durch Berücksichtigung der intramolecularen Bewegung) sehr willkürlich zu sein, und man könnte leicht, wenn man die intramoleculare Bewegung in anderer Weise in Rechnung zieht, erheblich andere Werthe für die Wärmeleitungsconstante erhalten. Aus diesem Grunde scheint mir eine numerisch exacte Berechnung derselben aus der Theorie, so lange man nicht mehr über die intramoleculare Bewegung weiss, unmöglich zu sein.“ Ueber den Zusammenhang einer inneren Arbeit bei der Temperaturerhöhung der Gase und der Anzahl der Atome in den Gasmolecülen hatte Boltzmann schon am 28. November 1867 der Wiener Akademie eine Abhandlung vorgelegt. (Sitzungsber. der Wiener Akad., 2. Abth., LVI, Novemberheft 1867, Separatabdruck, S. 1 bis 9.)

[1]) Wiener Sitzungsber. LXXII, S. 458, 1876; Pogg. Ann. CLVII, S. 457.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

hältnissmässigen Antheile, welche die progressive Bewegung der Molecüle und die intramoleculare Bewegung an dieser Leitung haben. Für die Annahme, dass die intramoleculare Bewegung dieselbe Ausgleichsgeschwindigkeit wie die progressive Bewegung der Molecüle hat, findet er durch eine Verbesserung der Maxwell'schen Formel die Wärmeleitungsfähigkeit der Gase $l_{total} = \frac{5}{2}\,\eta c$; für die Annahme aber, dass die Wärmeleitung nur von der progressiven Bewegung der Molecüle herrührt, leitet er die Formel $l_{prog} = \frac{15(\gamma - 1)}{4}\,\eta c$ ab, wo $\gamma$ das Verhältniss der specifischen Wärmen bei constantem Druck und bei constantem Volumen bedeutet. Durch Vergleichung der so berechneten Werthe mit den durch Messung erhaltenen ergab sich dann die Formel

$$l = \frac{3}{13}\,l_{total} + \frac{10}{13}\,l_{prog},$$

die nun für alle Gase Leitungsconstanten lieferte, welche mit den Messungen genügend übereinstimmten. O. E. Mayer[1]) erlangte dann eine ähnliche Formel, indem er annahm, dass für die Fortpflanzung der kinetischen Energie der Molecüle die früher erwähnte Gleichung $l = 1{,}53\,\eta c$, für die Leitung der Atomenergie aber die ebenfalls von ihm aus der Diffusion entwickelte $l = \eta c$ gültig sei. Die Richtigkeit der so construirten Formel zeigte er durch die folgende Tabelle:

Leitungsfähigkeit:

| | Absolut | | Relativ | |
|---|---|---|---|---|
| | berechnet | beobachtet | berechnet | beobachtet |
| Kohlensäure . . . . . . | 0,0000328 | 0,0000317 | 0,667 | 0,642 |
| Stickoxydul . . . . . . | 0,0000342 | 0,0000363 | 0,695 | 0,665 |
| Ammoniak . . . . . . | 0,0000524 | — | 1,064 | 0,917 |
| Grubengas . . . . . . | 0,0000677 | 0,0000647 | 1,377 | 1,372 |
| Aethylen . . . . . . . | 0,0000422 | 0,0000414 | 0,858 | 0,752[2]) |

Zu abweichenden Resultaten ist wieder L. Grätz im Jahre 1881[3]) gekommen, der vorzüglich Winkelmann's Bestimmung des Temperatur-

[1]) Kinetische Theorie der Gase, Breslau 1877, S. 197.

[2]) Die Tabelle ist nach der Formel $l = \frac{1{,}53 . E + \mathfrak{E}}{E + \mathfrak{E}}\,\eta c$ berechnet, wo $E$ und $\mathfrak{E}$ die moleculare und die Atomenergie bedeuten.

[3]) Wiedem. Ann. XIV, S. 232, 1881. — L. Grätz, Docent an der Universität München.

coëfficienten der Wärmeleitung sich entgegensetzt. Nach seinen Messungen besteht die Wärmeleitung bei Luft, Wasserstoff und für niedere Temperaturen auch bei Kohlensäure nur in der Uebertragung von progressiver Energie, die intramoleculare Energie trägt nur unermesslich wenig zur Wärmeleitung bei, die Clausius'sche Formel mit der O. E. Mayer'schen Constanten, also $l = 1{,}530\,\eta c$, erweist sich für diese Gase als zutreffend. Auch für die Abhängigkeit der Wärmeleitung von der Temperatur gilt das Gesetz von Clausius; falls Abweichungen vorhanden sind, so können dieselben nur so wirken, dass die Leitung sich noch langsamer als mit der Quadratwurzel aus der Temperatur ändert. Winkelmann hält dem gegenüber zwar seine Resultate aufrecht, erachtet aber auch nach seinen weiteren Arbeiten die Frage noch nicht für spruchreif[1]).

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Die Wärmeleitung der Gase hängt nach dem Vorigen in zweifacher Weise von den specifischen Wärmen derselben ab und nimmt dadurch an allen Schwierigkeiten der Bestimmung dieser Grössen theil. Einestheil ist sie nach der Formel $l = 1{,}53\,\eta . c_v$ der specifischen Wärme bei constantem Volumen direct proportional, und anderentheils kann das Verhältniss der kinetischen Molecularenergie und der intramolecularen Atomenergie, die an der Wärmeleitung anscheinend in verschiedener Weise theilnehmen, nur aus dem Verhältniss der beiden specifischen Wärmen berechnet werden. Clausius gab noch in seiner für die mechanische Gastheorie fundamentalen Abhandlung von 1859 für das Verhältniss der Gesammtenergie $H$ und der rein progressiven Molecularenergie $K$ die Formel $\frac{K}{H} = \frac{3}{2} \cdot \frac{C - c}{c}$, wo $C$ die specifische Wärme bei constantem Druck und $c$ dieselbe bei constantem Volumen bezeichnen. Nehmen wir bei einatomigen Molecülen alle Energie als progressive an, so muss für solche Gase $\frac{K}{H} = 1$ und damit $\frac{C - c}{c} = \frac{2}{3}$ oder $\frac{C}{c} = \frac{5}{3}$ sein. In der That haben Kundt und Warburg[2]) durch Messungen an Quecksilberdampf (dessen Molecül einatomig ist) diese und damit auch die Clausius'sche Formel bestätigt. Für die mehratomigen Molecüle hat die Bestimmung des Verhältnisses $\frac{K}{H}$ ihre grossen Schwierigkeiten, weil die specifische Wärme $c$ bei constantem Volumen nicht gemessen und das zu ihrer Berechnung nöthige Verhältniss $\frac{C}{c} = k$ für die wenigsten Gase sicher bestimmt ist. Richtig scheint auch nach den neueren Messungen zu sein, dass $k$ für alle mehratomigen Molecüle kleiner als $^5/_3$ ist und mit der wachsenden Zahl der Atome im Molecül immer weiter ab-

[1]) Wiedem. Ann. XIV, S. 541, 1881.
[2]) Pogg. Ann. CLVII, S. 353, 1876.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

nimmt [1]. Einige Zeit glaubte man, dass das Verhältniss $\frac{K}{H}$ und damit auch der Werth $k$ wenigstens für alle Molecüle von gleicher Atomzahl gleich sein werde, Versuche aber, welche K. Strecker im Jahre 1881 [2] auf Anregung von Kundt an Chlor-, Brom- und Joddämpfen unternommen, haben auch das unwahrscheinlich gemacht. Strecker fand

| | $k$ | $\frac{K}{H}$ |
|---|---|---|
| für Chlor . . . . | 1,323 | 0,48 |
| für Brom . . . . | 1,293 | 0,44 |
| für Jod . . . . . | 1,294 | 0,44 |

während man sonst bei zweiatomigen Molecülen für $k$ keinen Werth unter 1,400 und für $\frac{K}{H}$ keinen Werth unter 0,60 gefunden hatte. Erklärt aber wird diese Veränderlichkeit des Verhältnisses $\frac{K}{H}$ vielleicht durch eine Bemerkung, welche O. E. Mayer schon in seiner kinetischen Theorie der Gase (S. 97) im Jahre 1877 machte, dass nämlich die Atomenergie möglicherweise von der chemischen Affinität der betreffenden Stoffe abhängig sei.

Ueber die Abhängigkeit der specifischen Wärmen und ihres Verhältnisses von der Temperatur ist natürlich noch weniger Sicheres auszusagen. Meist hatte man angenommen, dass eine solche Abhängigkeit nicht bestehe; E. Wiedemann jedoch constatirte im Jahre 1876 [3] bei verschiedenen mehratomigen Molecülen, wie Kohlensäure, ölbildendem Gas, Stickoxydul und Ammoniak, eine entschiedene Zunahme der specifischen Wärme mit der Temperatur [4]. Danach würde aber vor Allem bei den Gasen mit mehratomigen Molecülen die Wärmeleitung nicht bloss durch den Coëfficienten der inneren Reibung, sondern auch durch die specifische Wärme mit der Temperatur sich verändern, und die Abhängigkeit der Wärmeleitung von der Temperatur könnte weder durch das

[1] Vergl. auch O. E. Mayer, Kinetische Theorie der Gase, S. 94.

[2] Wiedem. Ann. XIII, S. 20, 1881.

[3] Pogg. Ann. CLVII, S. 1, 1876. Regnault hatte schon bei den Dämpfen der meisten Flüssigkeiten eine Veränderung der specifischen Wärme mit der Temperatur constatirt.

[4] Die Aenderung der specifischen Wärme mit der Temperatur lässt sich nach Wiedemann vielleicht dadurch erklären, dass bei der Erwärmung der betreffenden Gase eine allmälige Dissociation stattfindet, die eventuell nur in einer Lockerung des Zusammenhanges der einzelnen Atome besteht und der ein Wärmeverbrauch entspricht. — Eilhard Wiedemann, geb. 1852, Prof. der Physik in Erlangen.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Clausius'sche, noch durch das Maxwell'sche Gesetz richtig angegeben werden, wie das auch schon ausgesprochen wurde.

Einer merkwürdigen Ueberführung von Licht in mechanische Kraft, oder wenigstens einer directen Umwandlung der strahlenden Wärme in Massenbewegung schien Crookes im Jahre 1873 auf die Spur zu kommen. Directe Einwirkungen der Wärmestrahlen auf leicht beweglich aufgehängte Körper wollte man seit lange wahrgenommen haben. Despretz[1]) griff um die Mitte des Jahrhunderts das Thema wieder auf, um über die Beeinflussung der Galvanometernadeln durch thermische, nicht elektrische Ursachen klar zu werden. Wenn er die Hand auf die Glocke des Galvanometers legte, oder wenn er dieselbe nur in die Nähe der Glocke brachte, so wurde die Nadel abgelenkt; stärker wirkte selbst noch in grösserer Entfernung eine brennende Wachskerze oder eine glühende Kohle. Geringere, doch deutliche Ablenkungen erhielt er auch durch Eis. Dieselben Erscheinungen wie die Magnetnadeln zeigten aber auch Nadeln aus Papier, Stroh u. s. w. Despretz glaubte, dass die strahlende Wärme direct diese Ablenkungen hervorbringe. Pouillet[2]) jedoch machte sofort dagegen geltend, dass dergleichen Erscheinungen schon lange bekannt seien und dass es zu ihrer Erklärung der Annahme einer neuen Wirkungsart der Wärme jedenfalls nicht bedürfe. Schon im Jahre 1751 habe J. E. Bertier[3]) in Gegenwart von Réaumur, Le Roy, Nollet, Bouguer u. A. gezeigt, dass lange, an seidenen Fäden aufgehängte und in einen Kasten eingeschlossene Nadeln von Stroh durch Einwirkung einer Flamme von aussen aus ihrer Richtung abgelenkt werden können. 1825 habe Fresnel[4]) bemerkt, dass zwei unter der Luftpumpe an Coconfäden aufgehängte Scheiben sich abstossen, wenn man in ihrer Nähe mit einer Sammellinse ein Sonnenbildchen erzeugt. Aehnliche Attractionen und Repulsionen hätten auch v. Lebaillif im Jahre 1826 und ebenso J. Fr. Saigey in den folgenden Jahren[5]) beobachtet. Endlich habe Pouillet[6]) selbst eine Reihe dahin gehender Experimente noch im Jahre 1829 mit einer vollständig genügenden Erklärung dieser Erscheinungen veröffentlicht. Wenn man nämlich drei Nadeln von Stroh an Haaren in einer Büchse, die vorn ein Glasfenster hat, über einander aufhängt, und diesem Fenster ein Licht gegenüberstellt, so weichen die obere und die untere Nadel nach ent-

---

[1]) Sur la déviation de l'aiguille aimantée par l'action des corps chauds et froids, Compt. rend. XXIX, p. 225, 1849.

[2]) Compt. rend. XXIX, p. 245.

[3]) Sur l'attraction et la répulsion des corps terrestres sans être électrisés, Mém. de l'Ac. des sc. 1751. Entsprechende Beobachtungen machte auch Michell mit einem nach Art der Drehwage eingerichteten Instrument, das in Priestley's Geschichte der Optik (Deutsche Uebersetzung 1776. S. 282) beschrieben ist.

[4]) Bull. de la Soc. Philomath. 1825, p. 84.

[5]) Bull. de Férrussac VIII, p. 287, 1827; IX, p. 87, 167, 239, 1828.

[6]) Ann. de chim. et de phys. (2) XL, p. 196, 1829.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

gegengesetzten Seiten, die mittlere aber weicht unregelmässig das eine Mal nach der einen, das andere Mal nach der anderen Seite hin ab; woraus offenbar hervorgeht, dass alle jene Ablenkungen und Bewegungen nur von den durch die Wärme hervorgebrachten Luftströmungen verursacht werden. Despretz[1]) bemerkte darauf zu seiner Vertheidigung, dass er niemals die von ihm beobachteten Erscheinungen einer unbekannten Wirkungsart der Wärme zugeschrieben habe; er habe nur die Wärme im Allgemeinen als die letzte Ursache genannt, weil man die Erscheinungen ebenso wohl wie von Luftströmungen, auch von Veränderungen des hygrometrischen oder auch des magnetischen Zustandes[2]) der Körper durch die Wärme habe ableiten wollen.

So blieb die Sache in Ruhe, bis Crookes um das Jahr 1873 neue Beobachtungen beibrachte, die der Theorie der Luftströmungen grössere Schwierigkeiten bereiteten. Crookes[3]) hängte in einer Flasche einen leichten Strohhalm, der in Kugeln von Hollundermark, Glas, Holz, Platin etc. endigte, an einem Faden horizontal auf und bemerkte, dass warme Körper das kleine Horizontalpendel anzogen, so lange die Flasche mit Luft gefüllt war, dass aber, sowie man die Flasche evacuirte, die Anziehung geringer wurde und bei fortschreitender Verdünnung nach und nach in Abstossung überging. Kalte Körper brachten entgegengesetzte Wirkungen hervor, und durch Eis z. B. wurden im luftleeren Raume die Kugeln angezogen. Crookes führt als mögliche Erklärungsgründe dieser Attractionen und Repulsionen, ganz wie früher Despretz, Luftströmungen oder elektrische Kräfte oder endlich Verdampfung und Condensation von Wasser an. Er widerlegt aber alle diese Hypothesen und sagt über seine eigene Erklärung: „Der Eindruck, den ich habe, ist, dass die Abstossung, welche die Strahlung begleitet, direct herrührt von dem Stosse der Wellen auf die Oberfläche der sich bewegenden Masse ... Ob die Aetherwellen wirklich die bewegte Substanz stossen, oder ob an jener räthselhaften Grenzfläche, welche die feste von der gasigen Masse trennt, Schichten von condensirtem Gase liegen, die den Stoss aufnehmen und ihn auf die darunter liegende Schicht übertragen, sind Probleme, deren Lösung künftigen Untersuchungen vorbehalten bleiben muss.“ Gleichzeitig mit Crookes behandelte auch A. Bergner[4]) das Problem der thermischen Anziehungen und Abstossungen und leitete ebenfalls die

---

[1]) Compt. rend. XXIX, p. 273, 1849.

[2]) Siehe S. 318 d. Bandes.

[3]) Phil. Mag. (4) XLVIII, p. 65 u. 81, 1874; Proc. of the Roy. Soc. XXII, p. 37, 1874: On the action of heat on gravitating masses; Proc. of the Roy. Soc. XXIII, p. 373, 1875. Auch Nature XI, p. 494. — William Crookes, geb. 1832 in London, Chemiker und Physiker, lebt als Privatmann in London, Anhänger des Spiritismus.

[4]) Die Anziehung und Abstossung durch Wärme und Licht und die Abstossung durch Schall, Boizenburg 1874; Referat in Klein's Revue, III, S. 530.

Bewegungen der ponderablen Massen direct aus denen des Aethers ab. Nach ihm wird sowohl der Körper, welcher Wärme aufnimmt, als auch derjenige, welcher Wärme abgiebt, nach der Richtung der absorbirten oder ausgesandten Strahlen hin angezogen, die Abstossung geschieht durch das Aufeinandertreffen entgegengesetzter Aetherwellen. Ganz allgemein aber wurde das Interesse, als Crookes die Lichtwage zu der Lichtmühle[1]) oder, wie er das Instrument nannte, zu dem Radiometer vervollständigte, eine Erfindung, die augenblicklich so viel Nachahmungen, Abänderungen und Weiterbildungen, so viel wissenschaftliche Abhandlungen und erklärende Hypothesen hervorrief, wie kaum eine andere wissenschaftliche Entdeckung von erster Wichtigkeit, und die doch schliesslich ihre Bewunderer nicht ganz in der gehofften Weise befriedigt hat. Crookes ging damit auch dazu über, die Bewegung der Radiometerflügel nicht mehr den auftreffenden Aetherwellen direct, sondern vielmehr dem Stosse der nach der neueren Gastheorie geradlinig fortschreitenden Molecüle der in dem Radiometergefäss noch enthaltenen, verdünnten Gase zuzuschreiben, wie dies Tait und Dewar ähnlich schon vorher gethan hatten[2]). Danach werden die Gasmolecüle, welche auf ihrem Wege die berussten Seiten der Radiometerflügel treffen, nach ihrer Reflexion von diesen Flächen die Molecüle, die sich nach dem Flügel hinbewegen, theilweise zurückdrängen, weil sie an den berussten Flächen wärmer geworden sind und damit eine grössere lebendige Kraft gewonnen haben als jene. Es treffen also auf die erwärmten Flächen weniger Molecüle als sonst auf, dafür aber ist der Rückstoss der erwärmten Molecüle beim Abprallen um so kräftiger, und das Gleichgewicht kann trotzdem erhalten bleiben; das findet jedoch nur so lange statt, als die Dichte des Gases noch so gross ist, dass die mittlere Weglänge der Molecüle gegen die Dimensionen des Gefässes vernachlässigt werden kann. Ist dies nicht mehr der Fall, ist die Verdünnung und damit die freie Weglänge der Gasmolecüle bis zu einer gewissen Grenze vorgeschritten, überwiegt nun umgekehrt die freie Weglänge die Dimensionen des Gefässes be-

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

---

[1]) Proc. Roy. Soc. XXIII, p. 377, 1875; XXV, p. 136 u. 304, 1877; XXVII, p. 29: On repulsion resulting of radiation. Auch Nature XII, p. 58 u. 125; XIII, p. 391, 450 u. 489; XVI, p. 12. Ausführlich Phil. Trans. 1878, p. 243. Wie Berthold (Pogg. Ann. CLVIII, S. 483) bemerkt, hat Mairan schon im Jahre 1747 (Mém. de l'Acad. de Par. 1747, p. 630) eine Lichtmühle in folgender Weise beschrieben: „C'est une roue horizontale de fer d'environ 3 pouces diamètre, avant 6 rayons, à l'extrémité de chacun desquels est une petite aîle oblique, et dont l'axe, qui est aussi de fer, ne tient par sa pointe supérieure, qu'au bout d'une baguette de fer aimantée. La roue et cet axe ne pisent guère en tout que 30 grains.“ Das Rad machte aber unter dem Einflusse der durch ein Brennglas concentrirten Sonnenstrahlen keine regelmässigen Rotationen, sondern wechselte in seinen Bewegungen. Mairan schrieb dieselben den Luftströmungen zu und dachte zur näheren Untersuchung auch daran, den Apparat in einen luftleeren Raum zu bringen, gab aber den Plan der Schwierigkeit der Ausführung wegen auf.

[2]) Nature XII, p. 217, 1875.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

deutend, so wird die Kraft der zurückprallenden Molecüle sich theilweise oder ganz an den Flächen des einschliessenden Gefässes vernichten, und der Strom der gegen die erwärmte Fläche vordringenden Molecüle wird jetzt, seiner Antagonisten zu einem Theile beraubt, die Flügel des Radiometers in seinem Sinne bewegen. Dieser Erklärung schlossen sich zahlreiche Physiker an, und viele sahen danach in den Radiometererscheinungen „eine unerwartete und sehr bemerkenswerthe Bestätigung der neueren Gastheorie“ [1]). Andere aber, die mit abgeänderten Apparaten auch die Erscheinungen etwas anders als Crookes beobachteten, hielten diese Erklärung für unmöglich oder wenigstens ungenügend, und bemühten sich um Theorien, die ihren Erfahrungen besser zu entsprechen schienen. F. Neesen [2]) vertheidigte wieder die ältere Ansicht, nach welcher Luftströme, die an den erwärmten Flächen aufsteigen, das Zurückweichen dieser Flächen bewirken. Zum Beweise seiner Erklärung benutzte Neesen vor Allem Radiometer mit unsymmetrisch (excentrisch) in dem Gefäss aufgestelltem Radiometerkreuz. „Wenn nämlich, so sagt er, Luftströmungen die Ursache der Drehung der Lichtmühle sind in der Weise, dass die Luft an den bestrahlten Flächen sich erwärmt, aufsteigt und dadurch neue Luft nach sich zieht, so müssen mit der Zeit auch die Wände des Gefässes, in welchem das Radiometer sich befindet, ebenfalls Einfluss gewinnen, da auch sie sich erwärmen, also bei ihnen derselbe Vorgang sich wiederholt wie an den Flügeln. Ist dagegen die Drehung nur eine Reactionserscheinung, so ist kein Grund vorhanden für einen solchen Einfluss der festen Wände. Es ist nun anzunehmen, dass bei einer unsymmetrischen Stellung des Radiometers innerhalb der Glasglocke, in welcher dasselbe sich befindet, ein etwaiger Einfluss der Wände leicht sich erkennen lassen wird“ [3]). Neesen fand denn auch, dass bei einem solchen unsymmetrischen Radiometer wegen der schnelleren Erwärmung der geschwärzten Flächen zuerst eine Bewegung wie gewöhnlich eintritt, dass aber bei der allmäligen Erwärmung der Wände diese Bewegung auch in die entgegengesetzte übergehen kann. Selbst bei ungeschwärzten, vollkommen gleichen Radiometerflügeln, wo also keine ungleiche Erwärmung der verschiedenen Radiometertheile vorauszusetzen war, trat mit der Erwärmung der Hülle im excentrischen Radiometer die Bewegung ein, was auch geschah, wenn alle directen Licht- oder Wärmestrahlen von den Flügeln abgeblendet und nur die Hüllen erwärmt wurden. Neesen glaubte danach auf die Wirksamkeit von Luftströmungen im Radiometer sicher schliessen zu können, doch hat diese Theorie der Luftströmungen die Anerkennung einer ausschliesslichen

---

[1]) G. Salet in Compt. rend. LXXXIII, p. 968, 1876: „L'instrument de M. Crookes a donc perdu son côté mystérieux . . . Mais, en même temps, la théorie moderne des gaz reçoit une confirmation inattendue et des plus remarquables.“

[2]) Pogg. Ann. CLVI, S. 144, 1875; CLX, S. 143, 1877.

[3]) Pogg. Ann. CLX, S. 144.

Geltung ebenfalls nicht erlangen können, und Zöllner erklärte in einer bedeutenden Abhandlung über das Radiometer auch sie wie die früher erwähnten für ungenügend [1]).

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Die Lichtstrahlen üben allerdings, so polemisirt Zöllner in dieser Arbeit, auf jede Fläche, die sie treffen, eine abstossende Wirkung aus, aber dieser Lichtdruck beträgt nach den Berechnungen Maxwell's nur 0,0000000882 Pfund auf den Quadratfuss [2]), während Crookes am Radiometer eine 100000mal grössere Kraftentwickelung gemessen hat. Elektrische Kräfte sind nach Zöllner bei der Erklärung der Radiometerbewegungen auszuschliessen, weil die Bewegungen auch bei Anwendung gläserner Halbschalen statt der Radiometerflügel eintreten und weil keine Vertheilung von Elektricität in dem Apparat gedacht werden kann, welche die permanenten Bewegungen desselben verursachen könnte [3]). Luftströmungen dürfen nicht als Ursache der Radiometerbewegungen angesehen werden; denn an Radiometern mit nicht berussten Halbkugeln statt der einseitig geschwärzten Flügelblättchen gehen stets die concaven Seiten der Kugelschalen bei der Bewegung voran, während Anemometer

---

[1]) Pogg. Ann. CLX, S. 154, 296 u. 459, 1877.

[2]) Maxwell sagt (Treatise on Electricity and Magnetism, London 1873, Uebersetzung, Berlin 1883, II. Bd., S. 548): „Nimmt man an, dass kräftiges Sonnenlicht an einem Quadratmeter in der Secunde 124,1 Kilogrammometer Energie entwickelt, so würden in einem Cubikmeter Sonnenstrahlen $\frac{124}{300\,000\,000}$ oder 0,000 000 41 Kilogrammometer Energie enthalten sein. Hiernach würde der mittlere Druck, den eine zur Fortpflanzungsrichtung senkrechte Fläche pro Quadratmeter erleidet, 0,000 000 41 Kilogrammometer betragen. Da dieser Druck nur auf der von der Sonne beleuchteten Seite der Körper vorhanden ist, so würden diese scheinbar von den Sonnenstrahlen in der Richtung ihrer Fortpflanzung fortgestossen werden. Concentrirtes elektrisches Licht wird wahrscheinlich einen noch stärkeren Druck ausüben, und es ist nicht unmöglich, dass die Strahlen eines solchen Lichtes, wenn sie auf ein dünnes metallisches Plättchen, das in einem Vacuum aufgehängt ist, fallen, an diesem einen beobachtbaren mechanischen Effect hervorbringen."

[3]) Doch zeigten sich manche Physiker, wie Challis, P. Delsaulx, W. de Fonvielle, W. Hankel u. A. als Anhänger elektrischer Theorien des Radiometers. Neesen sagt am Ende der schon erwähnten Abhandlung (Pogg. Ann. CLX, S. 153): „Erwähnen will ich noch schliesslich, dass das Radiometer, wie auch anderweitig beobachtet ist, sehr empfindlich ist gegen Elektrisirung. Es scheint sich beim Erwärmen die einschliessende Glasglocke etwas zu elektrisiren und auch hierdurch einen Einfluss auszuüben." Muncke aber hatte schon 1830 eine elektrische Theorie der thermischen Anziehungen und Abstossungen angedeutet (Pogg. Ann. XVIII, S. 239): „Die räthselhaften Drehungen des Wagebalkens in der Coulomb'schen Drehwage, die ich Ihnen im Herbst gemeldet habe, sind nichts Anderes als die Wirkungen der Thermoelektricität, so sehr ich auch geneigt war dies auszuschliessen, und sind die nämlichen Erscheinungen, welche nach Mark Watt in Edinburgh Journal of Science 1828 von dem Licht nach Pfaff in Schweigger's Journal LVI von der Wärme herrühren sollen."

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

von ganz gleicher Construction durch Windströme stets in entgegengesetzter Richtung bewegt werden. Gegen die Theorie von Crookes wendet Zöllner vor Allem ein, dass die nothwendige Voraussetzung derselben, nämlich das bedeutende Ueberwiegen der Grösse der freien Weglängen der Gasmolecüle über die Dimension der Gefässe, durchaus nicht stattfinde. Tait und Dewar nähmen allerdings die Gasdichte im Radiometer zu $^1/_{400000}$ der normalen, den Druck also zu 0,00019 mm Quecksilber an, wonach die mittlere Weglänge der Molecüle 400 mm betragen würde. R. Finkener[1]) aber berechne bei seinen Versuchen den niedrigsten Druck meist auf 0,025 mm, was einer freien Weglänge von nur 3 mm entspricht, und Crookes selbst gäbe bei den gewöhnlichen Radiometern den Druck zu 0,19 mm an, woraus gar nur eine freie Weglänge von 0,37 mm resultirt. Diese Weglängen blieben hinter den Dimensionen der Gefässe, die bis 100 mm gingen, noch um ein Bedeutendes zurück, während sie doch dieselben vielmal übertreffen müssten, wenn die Crookes'sche Annahme zutreffen solle, dass die lebendige Kraft der reflectirten Molecüle sich nicht an anderen Molecülen, sondern an den Wänden der Gefässe erschöpfen müsse. Dazu komme noch, dass in den Radiometergefässen ausser dem betreffenden verdünnten Gase sich noch Dämpfe von Quecksilber etc. befinden, deren Moleculargrössen viel bedeutender und deren mittlere Weglängen viel kleiner als die der Gase sind und die darum das Eintreten der Umstände, wie sie die kinetische Gastheorie erfordert, verhindern müssen. Zöllner hält nach alledem die Emissions- oder Evaporationstheorie des Radiometers, die zuerst Osborne Reynold's[2]) und nach ihm in ähnlicher Weise auch Govi[3]) angewandt hat, für die einzig mögliche. Nach dieser Theorie werden die Bewegungen der Radiometerflügel verursacht durch Verdünnungen und Verdichtungen des an ihnen adhärirenden Gases. Indem nämlich die Wärmestrahlen von den schwarzen Flächen der Flügel absorbirt werden, erwärmen sie dieselben und treiben, wenigstens theilweise, die von diesen Flächen absorbirten Gase aus. Durch den Rückfluss beim Ausströmen der Gase drehen sich die Flügel. Zöllner bildet die Theorie noch weiter fort. Er kommt auf seine Ideen über die Verdampfung der festen Körper bei gewöhnlicher Temperatur zurück und leitet die Bewegung der Radiometerflügel nicht bloss von dem Ausströmen absorbirter Gase, sondern von einer directen Dampfemission der festen Substanz der Flügel selbst zurück. „Die durch Undulationen des Aethers, sagt er, von der Oberfläche eines Körpers direct oder indirect aus-

---

[1]) Pogg. Ann. CLVIII, S. 573.

[2]) O. Reynold's (Prof. an dem Owen's College in Manchester): On the force caused by evaporation and condensation at a surface, Nature X, p. 174, 1874. On attraction and repulsion resulting from radiation of heat, Nature XII, p. 6, 1875.

[3]) Compt. rend. LXXXII, p. 1410, 1876.

gesandten Strahlen sind gleichzeitig von einer Emission materieller Theilchen nach der Richtung der Strahlen begleitet. Die Anzahl, Masse und Geschwindigkeit der in der Zeiteinheit emittirten Theilchen hängt von der physikalischen und chemischen Beschaffenheit der Oberfläche und von der Energie und Beschaffenheit der ausgesandten Strahlen ab.“ Danach erklärt er dann die Emissionstheorie so lange für voll und somit allein berechtigt, bis die Abwesenheit nicht bloss aller Dämpfe, sondern auch aller verdampfenden festen Körper im Radiometer sicher nachgewiesen ist. Trotzdem aber vermochte auch diese Theorie nicht zum Siege zu gelangen; neben ihr hielt sich in mindestens gleicher Anerkennung bis heute die kinetische Gastheorie, und es ist nicht unwahrscheinlich, dass die Bewegung der Radiometerflügel von mehreren Umständen beeinflusst wird und dass an mehreren Theorien Richtiges ist. In dieser Hinsicht bedarf es aber, um zur Entscheidung zu gelangen, jedenfalls noch mannichfacher Versuche, die weniger die Variation der Apparate und Erscheinungen als die genaue Bestimmung der allgemeinen Abhängigkeit der Bewegungen von den wirkenden Ursachen, den eindringenden Aetherwellen, der Beschaffenheit und Gestalt der Flügel und der Gefässwände, wie der Art des vorhandenen Gases u. s. w. zum Ziel haben. In der That haben sich auch die allerdings an Zahl schon sehr stark sich vermindernden Arbeiten über das Radiometer in neuerer Zeit mehr nach dieser Seite gewandt.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Nach der Betrachtung der Wärmewirkungen in der Molecularphysik müssen wir noch der Anwendung der Wärmetheorie auf kosmische Probleme gedenken, die in dieser Zeit keine geringere Rolle spielte und die für die neuere Entwickelung der Physik ebenfalls ihre sehr charakteristische Seite hat. Die Discussionen des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie zeigten, dass jedenfalls nicht der ganze Wärmeinhalt der Körper, bei der Entfernung der herrschenden mittleren Temperaturen vom absoluten Nullpunkt, in andere Formen von Energie übergeführt werden könne und dass mit der von selbst sich immer mehr vollziehenden Ausgleichung der Temperaturdifferenzen die vorhandene Menge transformirbarer Wärme sich immer mehr verringern müsse. Die Verallgemeinerung dieses zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie zu einem für alle Energieformen gültigen Principe liess dann auch diese Schlüsse für alle Energie gültig und damit die einstmalige Verminderung aller transformirbaren Energie überhaupt bis zur Null, d. h. das Ende alles Geschehens, als physikalisch sicher erscheinen. Nun machte man zwar gegen diese Schlusskette mit Recht geltend, dass dieselbe auf eine unendliche Reihe von Gliedern gehe und somit über die Grenzen unserer Erkenntniss hinausschreite. Dafür aber hat man sehr vielfach nicht umhin gekonnt, diesen Folgerungen der neuen Wärmetheorie wenigstens für unser Sonnensystem, das ja innerhalb des Universums doch eine gewisse Abgeschlossenheit in Bezug

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

auf die Mittheilung von Energie zeigt, insofern nachzugehen, als man die Geschwindigkeit der Energieausgleichung in diesem näher zu bestimmen oder, worauf es meist hinauskam, in unserer Vorstellung zu vermindern versuchte. Da unleugbar alle Wirkungsfähigkeit in unserem Sonnensysteme von den Wärmedifferenzen zwischen der Sonne und den Planeten herrührt und mit dem Ausgleich dieser Differenzen auf einen unmerklichen Werth herabsinken muss, so handelte es sich vor Allem um die Erhaltung der nutzbaren Sonnenenergie gegenüber dem immerwährenden Wärmeverlust der Sonne.

Die Ausstrahlung der Sonne beträgt nach Herschel pro Stunde für jeden Quadratfuss ihrer Oberfläche 18 000 000 Wärmeeinheiten, und trotzdem hat man nie einen Rückgang der Sonnenwärme constatiren können. Um den durch die Ausstrahlung erlittenen Wärmeverlust der Sonne wieder zu ersetzen, müsste man auf ihr alle 36 Stunden eine Kohlenmasse von der Grösse unserer Erde verbrennen; die Verbrennung der Sonne selbst, wenn sie ganz aus Kohle bestände, würde die Ausstrahlung derselben nur auf ca. 5000 Jahre decken. Daraus geht hervor, dass die Sonne nicht als ein verbrennender Körper gedacht werden kann. Wie J. Robert Mayer die immer wieder eintretende Ergänzung der Sonnenenergie durch das Aufschlagen von Meteormassen auf der Sonne in seiner Dynamik des Himmels von 1848 erklärte, haben wir schon erwähnt. Waterston und William Thomson haben bald nachher dieselbe Theorie ausgebildet. Nach Waterston würde ein eiserner Aërolith, der aus sehr grosser Entfernung gegen die Sonne fiele, sich beim Auftreffen um 1 800 000 000$^0$ (F.) erwärmen [1]. Nach W. Thomson [2] würde das Auffallen des Merkur auf die Sonne den Wärmeverlust derselben auf 6 Jahre 214 Tage decken, für Venus würde die Zahl 83 Jahre 227 Tage, für unsere Erde 94 Jahre 303 Tage betragen, der Jupiter aber würde durch sein Auffallen die Sonne sogar auf 32 240 Jahre mit Wärme versorgen. Diese Zahlen sprechen günstig für diese Theorie; doch hat man gegen die letztere eingewandt, dass sie, um die Sonnenwärme vollständig zu erklären, eine zu grosse Masse von Meteoren in allen Theilen des Universums voraussetzen müsste, als dass der Einfluss dieser Meteore auf die Planeten so unbemerkt hätte bleiben können, wie er es geblieben ist. Thomson hat darum die Annahme hinzugefügt, dass die Meteoriten nicht gleichmässig im Raume, sondern nahezu nur in der Ebene des Sonnenäquators vertheilt seien, wo sie auch die Erscheinung des Zodiakallichtes erzeugten. Indessen schien auch das nicht genügend, um jenes Bedenken zu heben, und ausserdem hielt man die Resultate Mayer's und Thomson's, nach denen die durch die Meteorfälle eintretende Vermehrung der Sonnenmasse unmerkbar sein müsse, nicht für einwurfsfrei. Eine neue Hypothese, die Helmholtz um dieselbe

---

[1]) Athenäum 1853; Phil. Mag. (4) XIX, p. 338, 1860.

[2]) Edinburgh Trans. XXI, p. 57 und 63, 1857 (gel. 1854).

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Zeit[1]) in einem populären Vortrage aufstellte, ergänzte darum die vorhergehende in dankenswerther Weise. Wenn gemäss der Laplace'schen Hypothese, so bemerkte Helmholtz, die Sonne wie das ganze Sonnensystem sich aus einem Nebelfleck zusammengezogen hat und wenn eine solche Zusammenziehung der Sonne noch immer stattfindet, so fallen alle Theilchen der Sonne noch immer nach ihrem Centrum hin, die hierdurch erhaltene lebendige Kraft wird in Wärme umgewandelt und ersetzt ihrerseits den Verlust, welchen die Sonne durch die Ausstrahlung erleidet. Unter der Annahme, dass die specifische Wärme der Nebelmaterie dieselbe ist wie die des Wassers, berechnet Helmholtz die Temperaturerhöhung, welche die Sonne bei einer plötzlichen Verdichtung aus dem Urnebel auf ihre jetzige Grösse erfahren würde, auf 28 611 000° und erweist, dass eine Zusammenziehung der Sonne um $^1/_{10000}$ ihres jetzigen Durchmessers allein die Ausstrahlung derselben auf über 2000 Jahre decken würde.

Gegen diese Ansicht hat in neuester Zeit William Siemens eingewendet, dass, wenn man auch die Erzeugung dieser Wärmemenge durch die Contraction in der ganzen Sonnenmasse zugeben wolle, man doch kaum annehmen dürfe, dass dieselbe mit einer genügenden Geschwindigkeit an die Oberfläche kommen könne, um die Ausgabe hier vollständig zu compensiren. Er hat dann selbst die Aufstellung einer neuen Theorie unternommen, die vor Allem auf der Möglichkeit einer Wiedergewinnung der von der Sonne nutzlos in den Weltenraum ausgestrahlten Wärme basirt[2]). Unsere Erde fängt von der aus der Sonne nach allen Seiten strahlenden Wärme nur den 2250 millionsten Theil auf, entsprechend dem Theil des Himmelsgewölbes, den dieselbe, von der Sonne aus gesehen, bedeckt. Nehmen wir an, was jedenfalls eher zu viel als zu wenig ist, dass alle übrigen Planeten und Planetoiden unseres Sonnensystems den Betrag dieser aufgefangenen Wärmemenge auf das Zehnfache erhöhen, so werden immer noch $\frac{224\,999\,999}{225\,000\,000}$ aller Sonnenwärme ungenutzt in dem Weltenraume sich zerstreuen, und von der nutzbaren Energie, welche die Sonne ausstrahlt, werden ca. 200 Millionen Theile verschwendet und nur ein Theil verbraucht. Man muss zugeben, dass eine solche Verschwendung der Natur nur schwer zuzutrauen ist, und jeder Versuch, diesen Vorwurf von ihr zu nehmen, wird jedenfalls unsere Sympathie verdienen. In solcher Absicht nimmt Siemens

---

[1]) Vorträge und Reden, Braunschweig 1884, S. 46 und 75; aus einem Vortrag „Ueber die Wechselwirkung der Naturkräfte“, gehalten am 7. Februar 1854.

[2]) Ueber die Erhaltung der Sonnenenergie. Eine Sammlung von Schriften und Discussionen von Sir Will. Siemens, übersetzt von C. E. Worms, Berlin 1885. — Die erste Abhandlung datirt von 1882. — Karl Wilhelm Siemens, 4. April 1823 Lenthe bei Hannover — 20. Nov. 1883 London, Physiker und Ingenieur, Leiter der Londoner Filiale der Firma Siemens u. Halske.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880

nun an, dass der Weltenraum nicht leer, sondern durchgängig von Gasen erfüllt ist, wofür auch die dynamische Theorie der Gase spricht. Jeder Himmelskörper wird dann aus diesen Stoffen eine Atmosphäre um sich ziehen, die in den niederen Schichten wie bei unserer Erde aus den schwereren Gasen, Stickstoff, Sauerstoff und Kohlensäure-Anhydrit, in den höchsten Schichten aber vor Allem aus dem leichtesten Gase, dem brennbaren Wasserstoff, bestehen wird. Der Gasgehalt, den man an gefallenen Meteorsteinen beobachtet hat, ist dafür ein sicheres Zeichen. Nach einer von Dr. Flight der Royal Society übergebenen Abhandlung z. B. betrug der Gasgehalt der untersuchten Meteorsteine das Sechsfache ihres Volumens und bestand aus 17,66 Proc. Stickstoff, 31,88 Proc. Kohlenoxyd, 0,12 Proc. Kohlensäure, 4,55 Proc. leichtem Kohlenwasserstoff und 45,79 Proc. Wasserstoff [1]). Denken wir uns nun den ungeheuren Sonnenball in einem von solchen Materien erfüllten Raume rotirend, so wird derselbe durch die gewaltige Centrifugalkraft seiner Bewegung an seinen Aequatorgegenden Gase in sehr grosser Menge in den Raum hinausschleudern, dafür werden aber in den leer gewordenen Raum von den Polen her die Gase des Himmelsraumes immerwährend zum Ersatz einströmen. Diese Gase, welche zum grössten Theile aus brennbaren Gasen bestehen, würden dann in der Sonne verbrannt, durch ihre Verbrennungswärme den Wärmeverlust der Sonne decken und dann am Aequator wieder ausgeworfen werden. Dadurch müssten freilich nach und nach auch die brennbaren Gase des Himmelsraumes alle aufgezehrt, statt dessen derselbe mit Verbrennungsproducten erfüllt und so unfähig werden, neuer Sonnenwärme als Quelle zu dienen. Es lässt sich aber zeigen, dass die Sonne selbst jene Verbrennungsproducte wieder regeneriren kann. Nach Bunsen und Sainte-Claire-Deville hängt die Zersetzung chemischer Verbindungen nicht bloss von der Temperatur (deren höhere Grade alle chemischen Verbindungen zersetzen), sondern auch von dem Druck ab. Siemens meint durch Experimente bewiesen zu haben, dass in Crookes'schen Röhren (bei einer Verdünnung der in ihnen enthaltenen Gase bis $^1/_{1800}$ Atmospäre) Wasserdampf schon durch auffallende Sonnenstrahlen in seine Bestandtheile Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt worden sei [2]). Danach würden also die von der Sonne ausgeschleuderten Verbrennungsproducte bei ihrer sehr grossen Verdünnung im Himmelsraume von den sie treffenden Sonnenstrahlen wieder in brennbare Stoffe zerlegt, die, später wieder zur Sonne zurückkehrend, dieser die ausgestrahlte Energie voll wieder ersetzten. Nur der Theil der Energie würde endgültig für die Sonne verloren sein, der

---

[1]) Nach Huggins zeigt die Spectralanalyse, dass der Kern eines Kometen fast dieselben Gase enthält. (Erhaltung der Sonnenenergie, S. 12.)

[2]) Erhaltung der Sonnenenergie, S. 17.

durch die Planeten absorbirt worden wäre, aber dieser Verlust der Sonne an Energie betrüge eben nur ein sehr Geringes, nämlich den 2000 millionsten Theil derjenigen, die die Sonne in jedem Augenblicke ausstrahlt und die wir bis jetzt für verloren ansehen mussten [1]).

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Die erwähnten Theorien der Erhaltung der Sonnenenergie enthalten alle nichts Widersprechendes und sind nicht unwahrscheinlich und können auch alle drei ganz gut zusammen bestehen. Die für den Augenblick wirksamste ist wohl die Theorie von Siemens, die weittragendste aber jedenfalls die von Mayer, denn sie verbindet unser System mit den übrigen Gliedern der Welt und verspricht die Erhaltung unseres Sonnensystems bis zum Untergang des Ganzen, d. h. bis zur Ausgleichung aller Energie im ganzen Universum.

Mit der Hypothese von Helmholtz begegneten sich Anwendungen der mechanischen Wärmetheorie, welche A. Ritter um den Anfang der achtziger Jahre [2]) auf kosmische Probleme machte und durch welche sogar eine mögliche Verbindung zwischen den Theorien von Mayer und Helmholtz angedeutet wurde. Ritter zeigte zuerst, dass nach der neuen Wärmetheorie auch eine Gaskugel als Individuum, als Himmelskörper wohl existiren könne, wenn nur der Zustand derselben ein adiabatischer sei, oder einem solchen sich doch nähere, d. h. wenn nur die Temperatur und die Dichte der Gaskugel mit der Entfernung vom Centrum nach demselben Gesetze wachsen und abnehmen, nach welchem dieselben in einer auf- oder absteigenden Gasmasse sich verändern, der bei der Bewegung weder Wärme zugeführt noch entzogen wird. Eine solche Gaskugel braucht bei aller Ausstrahlung von Wärme nicht nothwendig kälter zu werden, vielmehr könnte die durch die Zusammenziehung entstehende Wärme nicht bloss die Ausstrahlung decken, es könnte sogar der bei Weitem grössere Theil derselben zur Erhöhung der Temperatur der Kugel verwandt werden. Eine Abkühlung würde dann im Laufe des Processes überhaupt nicht eintreten, vielmehr würde mit der Zusammenziehung der Gaskugel bis in einen Punkt die Temperatur derselben bis ins Unendliche wachsen. Denken wir uns zur weiteren Betrachtung der möglichen Entwickelung der Weltsysteme, dass die innere Wärme einer in einem solchen Gleichgewichte befindlichen Gaskugel eine plötzliche Vermehrung, z. B. durch

---

[1]) Auf die mannigfaltigen Einwendungen gegen diese Theorie, vor Allem gegen die Erfüllung des Weltenraums mit leichten Gasen wie gegen die Dissociation des Wasserdampfes und der Kohlensäure durch das Sonnenlicht bei niederen Temperaturen antwortet Siemens noch in mehreren Abhandlungen seiner Schrift, auf die wir hier nicht näher eingehen können.

[2]) Wiedemann's Ann. V, S. 405; X, S. 13; XI, S. 978, XII, S. 445; XIII, S. 360; XIV, S. 16; XVI, S. 166; XVII, S. 322; XVIII, S. 488; XX, S. 137 und 897: Untersuchungen über die Höhe der Atmosphäre und die Constitution gasförmiger Weltkörper.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

einen Zusammenstoss mit anderen Massen, erhielte, so würde dadurch eine Ausdehnungsbewegung derselben eintreten. Diese Expansionsbewegung würde sich nach und nach verlangsamen, in Folge der Trägheit aber würde das Volumen jedenfalls die Grenze überschreiten, bei welcher die gravitirenden und die expandirenden Kräfte sich das Gleichgewicht halten. Dann müssen bei vollständiger Erschöpfung der Expansionsbewegung die gravitirenden Kräfte im Uebergewicht sein, und die Kugel muss nun in eine Contractionsbewegung eintreten. Im Verlaufe dieser werden durch die entstehende Wärme wieder die expandirenden Kräfte zunehmen und nach und nach auch die Contractionsbewegung zum Stillstande bringen. Aber wie vorher wird dies erst geschehen, wenn auch das untere Gleichgewichtsvolumen wieder überschritten ist und der Körper sich wieder auszudehnen beginnt. So wird diese Gaskugel in Schwingungen um eine nie fest zu haltende Gleichgewichtslage immerfort ihr Volumen und ihre Temperatur wechseln, ohne dass von aussen neue Kräfte auf sie wirken und obgleich sie immerwährend Wärme ausstrahlt. Durch solche von Volumenveränderungen veranlasste periodische Temperaturschwankungen erklärt Ritter in glücklicher Weise die Existenz der veränderlichen Sterne. Doch gehören nach ihm alle Himmelskörper mit wenigen Ausnahmen zur Classe dieser Sterne, nur dass bei den meisten die Veränderungen der Temperatur sehr gering sind oder sehr langsam vor sich gehen. Die Ausnahmen werden wohl nur durch einige Nebelflecke gebildet, bei denen die ursprüngliche expandirende Kraft der Wärme so gross ist, dass ein Gleichgewicht mit der gravitirenden überhaupt nicht eintreten kann und die Expansion bis zur Zerstreuung ins Unendliche sich fortsetzt[1]). Die nicht erfolglose Kühnheit in der Anwendung der mathematischen Analyse auf physikalisch-kosmologische Probleme durch Ritter hat ihres imponirenden Eindrucks nicht verfehlt; doch hat man auch wohl mit Recht darauf aufmerksam gemacht, dass diese Anwendung mehr interessant als sicher erscheinen muss. Die Voraussetzung der Gültigkeit physikalischer Gesetze, wie des Mariotte'schen und des Gay-Lussac'schen, bei Druck- und Temperaturverhältnissen, die weit über die Grenzen unserer Beobachtung hinausgehen, ist jedenfalls ebenso wenig in ihrer Berechtigung gesichert, als die Anwendung unserer Erfahrung auf Räume und

---

[1]) Ritter berechnet, dass jedes Massenkilogramm der Sonne, wenn dieselbe eine adiabatische Gaskugel wäre, zwischen 66, 6 und 19 Millionen Calorien enthalten müsste, dann aber würde durch die jährliche Ausstrahlung der Radius nur 72 bis 114 m an Länge abnehmen. In Betreff einer Mondatmosphäre findet er, dass auf einem isolirt im Weltenraume ruhenden Körper von der Grösse und der Masse des Mondes eine Atmosphäre aus Wasserdampf auf die Dauer nur bei einer Oberflächentemperatur von minus 50 Grad Celsius möglich wäre, dass aber der bewegte Mond in seiner Umgebung, selbst wenn er aus einer Eiskugel bestände, noch bei einer Oberflächentemperatur von minus 60 Grad Cels. sich in einen die Erde umkreisenden Dampfring verwandeln müsste.

Zeiten, die weit über die Grenzen unserer Vorstellungsfähigkeit noch hinaus liegen. Mehr und weniger gilt das Letztere auch von den vorher erwähnten Hypothesen über die Zukunft unserer Welt; vielleicht aber sind jene Arbeiten doch die ersten Anfänge einer über die Grenzen der Erde hinausgreifenden, zur wirklichen Weltherrschaft sich entwickelnden physikalischen Wissenschaft. Zu dieser Entwickelung that auch die im Folgenden zu behandelnde physikalische Entdeckung einen über alle Erwartungen hinaus erfolgreichen Schritt.

Mechanik d. Wärmebewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Die kinetische Theorie der Gase hatte in Verbindung mit der mechanischen Wärmetheorie reiche und überraschende Früchte getragen und entwickelte sich immer mehr zu einer Mechanik der Molecüle. Der gasförmige Aggregatzustand hatte sich damit sowohl der physikalischen als der mathematischen Behandlung am leichtesten zugänglich erwiesen. Dieselbe Eigenschaft zeigte er gleichzeitig noch auf einem anderen Gebiete, und aus dem gleichen Grunde wie früher, nämlich durch seine Unabhängigkeit von der Wirkung der Molecularkräfte. Wie wir schon früher angedeutet, war die Undulationstheorie des Lichtes in ihrem Siegeslaufe überall da gehemmt worden, wo es sich um die Uebertragung der Bewegungen von dem Aether auf die Theile der ponderablen Materie und umgekehrt gehandelt hatte. Die Absorption des Lichtes durch die körperlichen Molecüle hinderte überall den vollen Erfolg der mathematischen Entwickelungen, und über die Abhängigkeit des ausgesandten Lichtes von der atomistischen und molecularen Beschaffenheit der Körper war man ganz im Unsicheren geblieben. Diese Räthsel lösten sich zum Theil wenigstens in höchst überraschender Weise durch Kirchhoff und Bunsen's Entdeckung der **Spectralanalyse**, aber wie auf den anderen Gebieten waren auch hier die Gesetze der Erscheinung in klarer und sicherer Weise nur für den gasförmigen Zustand der Materie abzuleiten.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1850 bis c. 1880.

Was die Genesis der Entdeckung anlangt, so hatte es auch vor Kirchhoff durchaus nicht an guten Beobachtungen weder der Brechungs- noch der Beugungsspectren gefehlt. Aber diese vielfachen und fleissigen Untersuchungen hatten alle mehr oder weniger nur die Constatirung und regelrechte Beschreibung der Thatsachen im Auge und hatten etwaige Zusammenhänge der Lichterscheinungen mit der Constitution der lichtaussendenden Körper mehr nebenbei behandelt, als für eine Hauptaufgabe der Forschung anerkannt. Kirchhoff und Bunsen im Gegentheil gaben (zuerst wenigstens) keine neuen Thatsachen, sondern legten nur den Zusammenhang der Erscheinungen, das in der Mannigfaltigkeit der letzteren ruhende feste Gesetz dar, und diese Klarlegung des Gesetzes erst befruchtete rückwärts auch die Empirie in solcher Weise, dass statt vereinzelter Arbeiter nicht bloss die Physiker,

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

sondern auch die Chemiker und die Astronomen fast ausnahmlos sich mit den neuen Erscheinungen beschäftigten und aus ihnen die überraschendsten Resultate gewannen. Dies erscheint nicht nur als ein weiteres sicheres Zeichen dafür, dass Kirchhoff und Bunsen allein die wirklichen Entdecker und die eigentlichen Eroberer des neuen Gebietes waren, sondern lässt auch wieder als sicheren Schluss betonen, dass nicht in der blossen Beschreibung der Thatsachen, in der damit verbundenen Vereinzelung der Wissenschaften, sondern vielmehr in der Erkenntniss des ursächlichen Zusammenhanges der Dinge, in der Verbindung der Wissenschaften der wahre Fortschritt derselben enthalten ist [1]).

Kirchhoff gab die erste Nachricht von der mit R. Bunsen gemeinschaftlich gemachten Entdeckung in einer nur zwei Octavseiten umfassenden Abhandlung, die in dem Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin vom October 1859 (S. 662) unter dem Titel:

---

[1]) Dass in der Erkenntniss des Zusammenhanges der dunklen und hellen Spectrallinien und der Erklärung desselben der Kern der neuen Entdeckung lag, erkannte auch W. Thomson in den folgenden Worten an, die er bald nach der ersten Veröffentlichung von Bunsen und Kirchhoff an den Letzteren richtete: „Prof. Stokes mentioned to me at Cambridge sometime probably about ten years ago, that Prof. Miller had made an experiment testing to a very high degree of accuracy the agreement of the double dark line $D$ of the solar spectrum with the double bright line constituting the spectrum of the spirit lamp burning with salt. (Vergl. S. 484 d. Bds.) I remarked that there must be some physical connection between two agencies presenting so marked a characteristic in common. He assented and said, he believed a mechanical explanation of the cause was to be had on some principles as the following: Vapour of sodium must possess by its molecular structure a tendency to vibrate in the periods corresponding to the degree of refrangibility of the double line $D$ . . . On the other hand vapour of sodium in an atmosphere round a source must have a great tendency to retain in itself i. e. to absorb and to have its temperature raised by light from the source of the precise quality in question . . . I am not sure wether Prof. Stokes' suggestion of a mechanical theory has ever appeared in print. I have given it in my lectures regularly for many years, always pointing out along with it that solar and stellar chemistry were be studied by investigating terrestrial substances giving bright lines on the spectra of artificial flames corresponding to the dark lines of the solar and stellar spectra“ (Kirchhoff, gesamm. Abhandl., Leipzig 1882, S. 640). Wenn aber Tait dann (Vorlesungen über einige neuere Fortschritte, Braunschweig 1877, S. 159) von diesen Vorgängen sagt: „Das war die Geburt der Spectralanalyse, soweit es ihre Anwendung auf die Himmelskörper betrifft“, so widerspricht das der wissenschaftlichen, wohl berechtigten Gepflogenheit, nur denjenigen als den Entdecker anzusehen, der seine Entdeckung zuerst bis zu einer gewissen Reife ausgebildet und bekannt gemacht hat. Ist es ausserdem wahr, was Tait etwas weiter behauptet: „Weder Stokes noch Thomson scheinen im Jahre 1850 auch nur im Geringsten gewusst zu haben, dass sie auf etwas Neues gestossen waren“ (ibid. S. 162), so würde gerade für jene beiden genialen Forscher zu schliessen sein, dass dieselben die Tragweite und damit auch das wirkliche Wesen der Entdeckung doch im Jahre 1850 noch nicht erfasst hatten.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

Ueber die Fraunhofer'schen Linien, erschien[1]). Da die Abhandlung alles Spätere *in nuce* schon enthält, wollen wir dieselbe mit Ausnahme zweier Auslassungen wörtlich anführen: „Bei Gelegenheit einer von Bunsen und mir in Gemeinschaft ausgeführten Untersuchung über die Spectren farbiger Flammen, durch welche es uns möglich geworden ist, die qualitative Zusammensetzung complicirter Gemenge aus dem Anblick des Spectrums ihrer Löthrohrflamme zu erkennen, habe ich einige Beobachtungen gemacht, welche einen unerwarteten Aufschluss über den Ursprung der Fraunhofer'schen Linien geben und zu Schlüssen berechtigen von diesen auf die stoffliche Beschaffenheit der Atmosphäre der Sonne und vielleicht auch der helleren Fixsterne. Fraunhofer hat bemerkt, dass in dem Spectrum einer Kerzenflamme zwei helle Linien auftreten, die mit den beiden dunklen Linien $D$ des Sonnenspectrums zusammenfallen. Dieselben hellen Linien erhält man lichtstärker von einer Flamme, in die man Kochsalz gebracht hat. Ich entwarf ein Sonnenspectrum und liess dabei die Sonnenstrahlen, bevor sie auf den Spalt fielen, durch eine kräftige Kochsalzflamme treten. War das Sonnenlicht hinreichend gedämpft, so erschienen an Stelle der beiden dunklen Linien $D$ zwei helle Linien; überstieg die Intensität jenes aber eine gewisse Grenze, so zeigten sich die beiden dunklen Linien $D$ in viel grösserer Deutlichkeit, als ohne Anwesenheit der Kochsalzflamme.“ Nachdem dann Kirchhoff noch zwei ähnliche Versuche beschrieben, fährt er fort: „Ich schliesse aus diesen Beobachtungen, dass farbige Flammen, in deren Spectren helle, scharfe Linien vorkommen, Strahlen von der Farbe dieser Linien, wenn dieselben durch sie hindurchgehen, so schwächen, dass an Stelle der hellen Linien dunkle auftreten, sobald hinter der Flamme eine Lichtquelle von hinreichender Intensität angebracht wird, in deren Spectrum die Linien sonst fehlen. Ich schliesse weiter, dass die dunklen Linien des Sonnenspectrums, welche nicht durch die Erdatmosphäre hervorgerufen werden, durch die Anwesenheit derjenigen Stoffe in der glühenden Sonnenatmosphäre entstehen, welche in dem Spectrum einer Flamme helle Linien an demselben Orte erzeugen. Man darf annehmen, dass die hellen, mit $D$ übereinstimmenden Linien im Spectrum einer Flamme stets von einem Natriumgehalte derselben herrühren; die dunklen Linien $D$ im Sonnenspectrum lassen daher schliessen, dass in der Sonnenatmosphäre

[1]) Auch in den gesammelten Abhandlungen Kirchhoff's, S. 564, ebenso in Pogg. Ann. CIX, S. 148. Dieser Abhandlung ging auf optischem Gebiete nur eine Arbeit „Ueber den Winkel der optischen Achsen des Aragonits für die verschiedenen Fraunhofer'schen Linien“ (Pogg. Ann. CVIII, S. 567) kurz voraus. Die letztere enthält noch keine Andeutung des Gedankens der Spectralanalyse, dafür aber die Beschreibung eines Apparates zur Messung der Achsenwinkel für die verschiedenen Fraunhofer'schen Linien, der wohl zu dem Spectralapparate geführt haben könnte.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

Natrium sich befindet" . . . „Die Untersuchung der Spectren farbiger Flammen hat hiernach ein neues und hohes Interesse gewonnen; ich werde gemeinschaftlich mit Bunsen dieselbe so weit führen, als es unsere Mittel gestatten. Dabei werden wir die durch meine Beobachtungen festgestellte Schwächung der Lichtstrahlen in Flammen weiter erforschen. Bei den Versuchen, die in dieser Richtung von uns bereits angestellt sind, hat sich schon eine Thatsache ergeben, die uns von grosser Wichtigkeit zu sein scheint. Das Drummond'sche Licht erfordert, damit in ihm die Linien $D$ dunkel hervortreten, eine Kochsalzflamme von niederer Temperatur. Die Flamme von wässerigem Alkohol ist hierzu geeignet, die Flamme der Bunsen'schen Gaslampe aber nicht. Bei der letzteren bewirkt die kleinste Menge von Kochsalz, sobald sie überhaupt sich bemerklich macht, dass die hellen Natronlinien sich zeigen. Wir behalten es uns vor, die Consequenzen zu entwickeln, die an diese Thatsache sich knüpfen lassen."

In dieser zuletzt angedeuteten Richtung bewegten sich auch zunächst die Arbeiten Kirchhoff's. Noch im December 1859 veröffentlichte er wieder eine kürzere Abhandlung „Ueber den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme"[1]), worin er den allgemeinen Satz aufstellte, „dass für Strahlen derselben Wellenlänge bei derselben Temperatur das Verhältniss des Emissionsvermögens zum Absorptionsvermögen bei allen Körpern dasselbe ist". Zum Beweise des Satzes machte er die Annahmen, dass ein Körper wenigstens möglich ist, der nur Strahlen einer Wellenlänge aussendet und nur Strahlen derselben Wellenlänge absorbirt, und dass Spiegel möglich sind, welche alle Strahlen vollständig reflectiren. Denkt man sich dann einer Platte von der ersteren Eigenschaft eine andere gegenübergestellt, die alle möglichen Strahlen aussendet und absorbirt, und denkt man sich die Rückseiten der Platten als vollkommene Spiegel, so lässt sich leicht aus der Gleichheit der Ausstrahlung und der Absorption bei eingetretenem Temperaturgleichgewicht für jene beiden Platten und danach auch für alle Körper die Constanz des Verhältnisses des Emissions- und Absorptionsvermögens für dieselbe Temperatur erschliessen. In einer ausführlicheren Abhandlung vom Jahre 1861 hat dann Kirchhoff seinen Satz ausführlicher, strenger und mit Hinweglassung der Annahme von der Möglichkeit eines Körpers, der nur eine Strahlenart aussendet und absorbirt, begründet[2]).

---

[1]) Monatsber. der Berliner Akademie, December 1859, S. 783; Gesammelte Abhandl., Leipzig 1882, S. 560.

[2]) Untersuchungen über das Sonnenspectrum und die Spectren der chemischen Elemente, Abhandl. der Berliner Akademie 1861; daraus „Ueber das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht" in „Gesammelte Abhandlungen" S. 571.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

Dieser Satz, der die Anwendung der Spectralbeobachtungen auf die Untersuchung der chemischen Zusammensetzung der Sonne und der Gestirne ermöglichte, war den Entdeckern wohl von erster Wichtigkeit und wurde darum besonders hervorgehoben. Der andere, auf dem überhaupt die Anwendung der neuen Methode zur Analyse beruhte, nämlich der Satz von der alleinigen Abhängigkeit der Spectren von den lichtaussendenden Elementen, wurde zuerst weniger betont und als mehr selbstverständlich den Abhandlungen zu Grunde gelegt. Doch holten noch im April 1860 die beiden Gelehrten auch die erfahrungsmässige Begründung dieses Satzes in der gemeinsamen Arbeit „Chemische Analyse durch Spectralbetrachtungen“ [1]) erschöpfend nach. Sie beobachteten die Spectra der Bromide, Jodide, Oxydhydrate, der schwefel- und kohlensauren Salze von Kalium, Natrium, Lithium, Strontium, Calcium und Barium, die in den Flammen von Schwefel (1820° C.), Schwefelkohlenstoff (2195° C.), Leuchtgas (2350° C.), Kohlenoxyd (3042° C), Wasserstoff (3259° C.) oder Knallgas (8061° C.) glühten, und erhielten durch diese umfassende und zeitraubende Untersuchung die Sicherheit, „dass die Verschiedenheit der Verbindungen, in denen die Metalle angewandt wurden, die Mannigfaltigkeit der chemischen Processe in den einzelnen Flammen und der ungeheure Temperaturunterschied dieser letzteren keinen Einfluss auf die Lage der den einzelnen Metallen entsprechenden Spectrallinien ausübt“. Ja, als sie in Geissler'schen Röhren den elektrischen Funken zwischen Elektroden aus Kalium, Natrium, Lithium, Strontium und Calcium überspringen liessen und die entstehenden Funkenspectren mit den dahinter erzeugten, entsprechenden Flammenspectren verglichen, kamen sie zu der Ueberzeugung, dass sogar in den glänzenden Spectren jener elektrischen Funken die hellen Linien der Flammenspectren unverrückt vorhanden wären, und dass einzelne fremde, helle Linien der Anwesenheit von fremden Metallen, sowie auch dem in den Röhren enthaltenen Stickstoff zugeschrieben werden müssten. Danach hielten die Entdecker mit Recht für wissenschaftlich sicher begründet, dass die hellen Linien im Spectrum als sicheres Kennzeichen der Anwesenheit der betreffenden Metalle betrachtet werden dürfen, und gingen danach zur Beschreibung der einzelnen Spectra, sowie zur besseren Kennzeichnung der Vortheile ihrer chemisch-analytischen Methode über. Auch die Möglichkeit der kosmischen Anwendung ihrer Analyse trat in dieser Abhandlung noch deutlicher als früher hervor, indem den Entdeckern nicht bloss wie früher die Umkehrung der Natronlinien, sondern auch die der helleren Linien von Kalium, Strontium, Calcium und Barium leicht gelang.

---

[1]) Pogg. Ann. CX, S. 161; Gesammelte Abhandlungen, S. 598. Beigegeben sind die Abbildungen des Spectralapparates (noch ohne Maassstab), sowie der Spectra des Sonnenlichtes und der Metalle Kalium, Natrium, Lithium, Strontium, Calcium und Barium.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

Den besten Beweis für die Originalität und Wichtigkeit der Kirchhoff-Bunsen'schen Entdeckung lieferte die erstaunlich schnelle und grosse Fruchtbarkeit derselben. Noch in der letztbesprochenen Arbeit vom April 1860 konnten Kirchhoff und Bunsen berichten, dass sie durch ihre neue Analyse die Existenz eines vierten Metalls der Alkaligruppe neben den bekannten Kalium, Natrium und Lithium unzweifelhaft festgestellt hätten, und gleich darauf gab Bunsen mit dem Namen Cäsium des neuen Metalls auch schon nähere Auskunft über dasselbe. Im nächsten Jahre durfte Bunsen noch die Entdeckung eines fünften Metalls der Alkalireihe, des Rubidiums, bekannt machen, und in demselben Jahre fand auch W. Crookes[1]) in einem selenhaltigen Niederschlage aus der Schwefelsäurefabrik Tilkenrode a. H. ein neues Element, Thallium, das Lamy[2]) als ein neues Schwermetall erkannte. Endlich entdeckten Reich und Richter[3]) im Jahre 1862 abermals ein neues, dem Aluminium sich anschliessendes Metall, das Indium, mit Hülfe der Spectralanalyse, und auch später sind noch mehrere neue Elemente nach dieser Methode gefunden worden.

Kirchhoff und Bunsen aber beschäftigten sich weiter mit der Vervollkommnung ihrer Apparate, wie mit der weitergehenden Anwendung derselben zum Studium der kosmischen Verhältnisse. Sie fügten im Jahre 1861[4]) ihrem Spectralapparate das dritte Rohr mit der Scala am Ende zur besseren Bestimmung der Lage der Linien bei und beschrieben auch die Aufstellung eines Reflexionsprismas, durch welches zur Vergleichung noch das Spectrum einer Normal-Lichtquelle unter das zu untersuchende Spectrum geworfen werden konnte. Ueber die Thatsache, dass alle chemischen Verbindungen eines Metalls immer dieselben Linien liefern, äussern sie dabei zwei weit tragende Vermuthungen, dass nämlich die Linien entweder ganz unbhängig sind von den mit den Metallen verbundenen Elementen, oder dass die chemischen Verbindungen in der Hitze zerfallen und dann die Spectren der Metalle überwiegen. Kirchhoff und Bunsen neigten mehr der zweiten sich auch als richtig ergebenden Anschauung zu, weil die Absorptionslinien z. B., welche sich in Joddämpfen zeigten, durch Jodkalium nicht hervorgebracht wurden. Zur stärkeren Ausbreitung der Spectren construirte Kirchhoff auch einen Apparat, der das Licht vierfach durch vier Flintglasprismen zerstreute[5]), und benutzte denselben vor Allem zur genaueren Untersuchung des Sonnenspectrums. Er constatirte so, dass in der

[1]) Phil. Mag. (4) XXI, p. 301, 1861.

[2]) Compt. rend. LIV, p. 1255, 1862.

[3]) Erdmann's Journ. f. prakt. Chem. LXXXIX, S. 441; XC, S. 172.

[4]) Pogg. Ann. CXIII, S. 337, 1861.

[5]) J. P. Cooke (Chemical News 1863) versah seinen Spectralapparat mit neun Schwefelkohlenstoffprismen und fand damit die Linien des Sonnenspectrums ebenso unzählig wie die Sterne.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

Sonnenatmosphäre in grösseren Mengen nur Eisen, Calcium, Magnesium, Natrium und Chrom, in geringeren aber auch Gold, Silber, Quecksilber, Aluminium und Cadmium vorhanden seien; Blei, Arsen, Antimon, Strontium, Lithium und Silicium schienen zu fehlen. Der Sonnenkörper besteht danach wohl, so schloss Kirchhoff, aus einer glühend flüssigen Masse, die von einer Dampfatmosphäre umgeben ist. Die Sonnenflecken sind Wolken oder Schlacken, deren grosse Veränderlichkeit auf Strömungen in der Sonnenatmosphäre zurückzuführen ist[1]).

Die Arbeiten über Spectralanalyse häuften sich direct nach der ersten Veröffentlichung Kirchhoff's und Bunsen's in solcher Weise, dass man noch in den Jahren 1860 und 1861 allein die Abhandlungen bekannterer Physiker zu Dutzenden zählen kann. Dabei trat bald ein neues zielgebendes Element in die Betrachtung ein, das bei Kirchhoff und Bunsen kaum ausgesprochen war, die Analogie mit den acustischen Erscheinungen. Stokes erklärte gleich im Jahre 1860[2]) das Kirchhoff'sche Gesetz durch eine optische Resonanz und Ångström hob 1862[3]) sehr nachdrücklich hervor, dass er schon 1853 bestimmt ausgesprochen habe, dass die Theilchen eines Körpers in Folge von Resonanz besonders diejenigen Wellenbewegungen des Aethers absorbiren, welche sie vermöge der Molecularkraft des Körpers mit Leichtigkeit selbst annehmen. Aber die Anwendung optischer Analogien erstreckte sich nicht bloss auf die Erklärung der Umkehrung der hellen Spectrallinien, sondern leitete auch das Auftreten der Linien selbst aus den inneren Bewegungen der leuchtenden Körper ab. Dadurch erhielt zwar einerseits die Spectralanalyse eine neue anschauliche Grundlage, andererseits aber wurde sie mit der Zurückführung ihrer Gesetze auf die Bewegungserscheinungen der kleinsten Theilchen der Körper auch in alle Schwierigkeiten der Moleculartheorie hineingezogen und litt durch deren Dunkelheiten mit.

Wenn wir einen Körper, etwa eine gespannte Saite oder eine Metallzunge oder auch die Luftsäule eines Blasinstrumentes, in tönende Schwingungen versetzen, so hängt die Geschwindigkeit dieser und damit die Tonhöhe nicht von der Gewalt des Anstosses, sondern nur von den

---

[1]) Mit dieser Abhandlung „Untersuchung über das Sonnenspectrum und die Spectren der chemischen Elemente" (Berliner Abhandlungen 1861, auch gesondert bei Ferd. Dümmler, Berlin 1862, in 2. Ausgabe) schliessen die grundlegenden Arbeiten Kirchhoff's über Spectralanalyse. Eine Fortsetzung in den Abhandlungen der Berliner Akademie von 1862 enthält weniger neue, als bestätigende Beobachtungen.

[2]) Phil. Mag. (4) XIX, p. 193, 1860.

[3]) Pogg. Ann. CXVII, S. 290. Wir haben indessen schon früher (S. 486) erwähnt, dass die damalige Auffassung Ångström's von der optischen Resonanz noch ziemlich unzutreffend war. — Anders Jäns Ångström, 13. Aug. 1814 Medelpad — 21. Juni 1874 Upsala, Professor der Physik in Upsala.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

Dimensionen, der Schwere u. s. w. der tönenden Körper selbst ab. In gleicher Weise wird auch die Geschwindigkeit der Lichtschwingungen, deren ein Stoff fähig ist, und damit die Farbe des Lichtes, welches er aussenden kann, nur von der Grösse und Spannung seiner Molecüle oder Atome abhängen. Da nun die Atome aller chemischen Elemente eine verschiedene Schwere haben, so wird auch jedes Element im glühenden Zustande nur eine besondere Art von Lichtschwingungen, also einfarbiges homogenes Licht, aussenden, das im Spectrum nur eine für jedes Element ganz eigenthümliche Linie giebt. Diese der Schwere etc. des Atoms angemessene Schwingungsart werden aber die Atome eines Elementes nur annehmen können, wenn sie ganz frei, ungehindert durch Verbindungen mit anderen sind, also im gasartigen Zustande. Nur von glühenden Gasen kann also homogenes Licht, kann ein aus Linien bestehendes Spectrum, ein Linienspectrum, kommen. Von Flüssigkeiten und festen Körpern, bei denen die Atome durch ihre Anziehungskräfte noch verschiedenartig an einander gekettet sind, werden immer die den Atomen eigenthümlichen Schwingungen durch solche Verbindungen verlangsamt oder auch beschleunigt werden, und wir werden statt der einen Schwingungsart alle möglichen Farbentöne erhalten. Für die Spectralanalyse sind also die Körper nur im gasförmigen Zustande zu verwenden. Aber dabei ist immer noch Mehreres zu beobachten. Es ist klar, dass den Atomen der Elemente andere Lichttöne eigenthümlich sein werden, als den meist schwereren Molecülen ihrer Verbindungen. Nun werden zwar in der Hitze der Flammen die meisten chemischen Verbindungen in ihre Elemente zerlegt, so dass man immer die charakteristischen Spectren der Elemente in den Flammenspectren erhält. Einige Verbindungen sind jedoch auch so weit feuerbeständig, dass sie sich in den gewöhnlich gebrauchten Flammen als Verbindungen erhalten und hier also die ihnen eigenthümliche Spectren und nicht die ihrer Elemente geben. Diese machen es nothwendig, dass man sich mit ihren Spectren erst vollständig bekannt macht, bevor man an eine allgemeine, sichere Benutzung der Spectralanalyse denken kann[1]). Dazu kommt noch ein Weiteres. Die Körper sind auch im glühenden Zustande von sehr verschiedener Leuchtkraft. Die Metalle treten in dieser Beziehung am meisten hervor, die Metalloide treten zurück, und vor Allem senden die gasförmigen Elemente auch glühend nur sehr wenig Licht aus, wie das

[1]) Da man auf den Sternen, der hohen Temperatur wegen, eine Zersetzung aller chemischen Verbindungen wohl als Regel annehmen kann, so wird die kosmische Anwendung der Spectralanalyse von der Untersuchung der möglicherweise sehr zahlreichen Verbindungsspectren unabhängig und eher sicherer Resultate fähig sein, als die Benutzung des Spectralapparates zur Untersuchung irdischer Stoffe, wie das sich auch gezeigt hat. Dafür wird sich dort wieder der Einfluss der Temperatur und des Druckes auf die Art des Spectrums in starker Weise geltend machen.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

ja schon aus der Umkehrung der hellen Linien der Körper durch Gasatmosphären hervorgeht. Die Spectren der letzteren lassen sich kaum anders beobachten als dadurch, dass man die Gase in Geissler'sche Röhren einschliesst und den elektrischen Funken hindurchschlagen lässt. Dabei üben aber jedenfalls hier wieder der herrschende Druck und die Temperatur bedeutenden Einfluss auf die Spectra aus. Starker Druck nähert die Molecüle der Gase, hindert die vollständige Freiheit ihrer Schwingungen, mischt dadurch in die den Molecülen eigenthümlichen Lichttöne zunächst die naheliegenden ein, verbreitert so die Linien im Spectrum zu mehr oder weniger breiten Bändern und verursacht damit den Uebergang des Linienspectrums in ein sogenanntes Bandenspectrum. In ähnlicher Weise wirken die Temperaturverhältnisse auf die Spectra ein; wie weit aber diese Veränderungen gehen können, ob sie nur die Breite der Linien oder ob sie gar die Art des Spectrums gänzlich verwandeln können, das zeigte sich bald als ein schwieriger Punkt.

Plücker, der schon im Anfange des Jahres 1859 [1]) eine Abhandlung über die Constitution der Spectren verdünnter Gase in Geissler'schen Röhren veröffentlicht hatte, machte 1862 [2]) darauf aufmerksam, dass man verschiedene Arten von Spectren auch an denselben Stoffen unterscheiden und dass man erst die Abhängigkeit der verschiedenen Spectren von der Temperatur feststellen müsse, ehe von einer Sicherheit der Spectralanalyse die Rede sein könne. Als Resultate einer grösseren mit Hittorf gemeinschaftlich unternommenen Reihe von Untersuchungen gab Plücker dann an [3]), dass man jedenfalls vom Wasserstoff, Stickstoff, Schwefeldampf und einigen anderen Gasen willkürlich zweierlei Arten von Spectren erhalten könne, nämlich ein schwaches, continuirliches, aus schattirten Feldern und ein anderes aus hellen Linien mit dunklen Zwischenräumen bestehendes Spectrum. Die erste Art der Spectren, welche bei schwachem Drucke in der Geissler'schen Röhre und durch den Strom eines kleinen Ruhmkorff'schen Inductionsapparates entstand, nannte Plücker Spectren erster Ordnung, die zweite, die leicht durch Einschalten einer Leydener Flasche in den Strom hervorgebracht wurde, bezeichnete er als Spectren zweiter Ordnung. Da die Einschaltung der Leydener Flasche in den Strom nur einen momentanen Durchgang grösserer Elektricitätsmengen durch die Röhre bewirkt, so war anzunehmen, dass die damit entstehende höhere Temperatur die Ursache der Verwandlung der Spectra erster Ordnung in solche zweiter Ordnung sei.

---

[1]) Pogg. Ann. CVII, S. 497 und 638.

[2]) Cosmos XXI, p. 283 und 312, 1862. Referat in „Die Fortschritte der Physik im Jahre 1862".

[3]) Phil. Trans. 1865, p. 1. — W. Hittorf, geb. am 27. März 1824, Professor der Physik in Münster.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

An Plücker schloss sich direct Wüllner an, der im Jahre 1866 zufällig beim Wasserstoff ausser dem Banden- und Linienspectrum, wie er zweckmässig die Plücker'schen Spectra erster und zweiter Ordnung bezeichnete, noch ein drittes Spectrum bemerkte. In einer grösseren Arbeit vom Jahre 1868 [1]) gab er dann ausführliche Nachrichten über die Aenderung der Spectren von Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff durch Aenderung des Druckes in Geissler'schen Röhren. Es fand sich, dass durch Druck dieselben Veränderungen hervorgebracht wurden, wie durch das Einschalten der Leydener Flasche in den Strom. Zog man z. B. aus einer Geissler'schen mit Wasserstoff gefüllten Röhre [2]), in der die Platinelektroden einen Abstand von 1,4 dm hatten, durch einen Sprengel'schen Aspirator den Wasserstoff nach und nach aus, so begann der Strom bei einem Druck von 135 mm durchzugehen, bei 70 mm Druck war das continuirliche Spectrum schon deutlich zu erkennen, bei 30 mm Druck war es am schönsten, danach aber nahm es an Helligkeit ab, und die drei hellen Linien des Linienspectrums begannen mehr hervorzutreten; bei 2 bis 3 mm Druck war das continuirliche Spectrum bis auf den letzten Rest verschwunden, die Linien aber behielten ihre Helligkeit. Bei noch weiter fortgesetzter Verminderung des Druckes nahm schliesslich auch die Intensität dieser Linien wieder ab, und es wurde zuletzt sogar ein Theil des continuirlichen Spectrums wieder im Grün sichtbar. Indessen schrieb Wüllner diese Veränderung der Spectren dem Drucke doch nicht unmittelbar zu, insofern, als er von der Veränderung des Druckes nur eine Veränderung des elektrischen Widerstandes und damit eine Veränderung der Temperatur der elektrischen Entladung und daraus dann erst die Umwechselung der Spectren ableitete. „Diese Beobachtungen zeigen, so sagt Wüllner [3]), dass das beschriebene (continuirliche) Wasserstoffspectrum in der That einer niedrigeren Temperatur angehört, als das aus den drei Linien bestehende, denn mit wachsender Dichtigkeit des Gases in der Spectralröhre muss die Temperatur derselben eine niedrigere werden, da der Inductionsstrom in dem dichteren Gase einen grösseren Widerstand findet und da eine grössere Menge des Gases erwärmt werden muss. Ebenso aber wie eine grosse Dichtigkeit des Gases den Strom nicht in voller Stärke sich entwickeln lässt, wird der Strom durch stärkere Verdünnung geschwächt, denn durch hinreichende Verdünnung lässt sich der Strom in einer Spectralröhre vollständig unterbrechen. Dass also bei grosser Dichtigkeit und bei sehr starker Verdünnung des Gases das continuirliche Spectrum auftritt, beweist, dass dasselbe einer niedrigeren Temperatur angehört."

---

[1]) Pogg. Ann. CXXXV, S. 497; CXXXVII, S. 337. — Ad. Wüllner, Professor der Physik am Polytechnicum in Aachen.

[2]) Die Röhren waren bei allen Versuchen in der Mitte zu einem capillaren Stück ausgezogen.

[3]) Pogg. Ann. CXXXV, S. 506.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

Die Behauptung des Auftretens mehrfacher, artlich ganz verschiedener Spectren bei einem und demselben Elemente rief vielen Widerspruch hervor, und insbesondere wandte sich Ångström scharf gegen Wüllner. Schon in seinen „Untersuchungen über das Sonnenspectrum" von 1868[1]) hatte sich Ångström gegen die mehrfachen Arten der Spectren erklärt. Er gab zu, dass die Spectren sich modificiren, dass mit der Steigerung der Temperatur neue Linien auftreten und die Helligkeitsverhältnisse sich verändern, dass bei unterbrochenen Entladungen und bei zunehmender Spannung in Geissler'schen Röhren auch die Linien sich ausdehnen und Linienspectren zu continuirlichen Spectren zusammenfliessen könnten, behauptete aber, dass dessenungeachtet niemals aus einem Spectrum ein solches von ganz anderem Charakter hervorgehen könnte. Drei Jahre[2]) später führte er die Beobachtung verschiedener Arten der Spectren vor Allem auf die Unsicherheit zurück, in die man geräth, wenn man die Verdünnung der Gase bis zu den äussersten Grenzen treibt. So zeigten sich in einer Geissler'schen Röhre bei stärkster Verdünnung der in ihr enthaltenen atmosphärischen Luft nach und nach das gewöhnliche Spectrum der Luft, dann das cannelirte des Stickstoffs, dann das des Kohlenoxyds und endlich sogar die Linien von Natrium und von Chlor. Danach spricht Ångström direct aus, dass die von Wüllner beobachteten verschiedenen Spectren des Wasserstoffs, Sauerstoffs und Stickstoffs von Verunreinigungen dieser Gase herrühren müssen, und er bemüht sich nachzuweisen, dass die von den Linienspectren abweichenden Spectren derselben solche der Kohle, des Schwefels und ihrer Verbindungen sind. Wüllner nahm daraus Gelegenheit, seine Untersuchungen vor Allem nach dieser Richtung hin fortzusetzen[3]). Er fand auch, dass zwei von ihm beschriebene Spectren des Sauerstoffs sehr wahrscheinlich Kohlenstoffverbindungen angehören, die wohl aus dem Fette stammten, mit welchem die Hähne der Quecksilberluftpumpe eingerieben waren. Für die beim Wasserstoff beobachteten Spectren aber ergab sich keine solche Unsicherheit, und bei denen des Stickstoffs zeigte sich ebenfalls keine Abhängigkeit von anderen Elementen. Da unter einem Drucke von 500 mm die beiden Stickstoffspectren oft gleichzeitig oder auch abwechselnd auftraten, so versuchte Wüllner auch den Einfluss klarer zu stellen[4]), den die verschiedenen

---

[1]) Recherches sur le Spectre Solaire, Upsala 1868, auch Berlin 1869. — Der Abhandlung ist die 3,387 m lange Abbildung eines Sonnenspectrums beigegeben, in welcher die Linien zum ersten Male nach ihrer Wellenlänge bestimmt sind. Die Abbildung ist unter Mitwirkung von R. Thalén hergestellt.

[2]) Compt. rend. LXXIII, p. 369, 1871. Pogg. Ann. CXLIV, S. 300.

[3]) Pogg Ann. CXLIV, S. 481, 1871.

[4]) Pogg. Ann. CXLVII, S. 321, 1872.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

Arten der elektrischen Entladungen auf das Spectrum ausüben. Er benutzte dabei Röhren, die überall gleich weit, nicht in der Mitte capillar zusammengezogen waren, und constatirte die Art der Entladung durch Beobachtung derselben in einem rotirenden Spiegel. Dabei traten, so lange die Entladung continuirlich blieb, immer nur Bandenspectren auf, während mit dem ersten übergehenden Funken auch direct die hellen Linien sich zeigten [1]), so dass der Zusammenhang der Bandenspectren mit der continuirlichen und der der Linienspectren mit der Funkenentladung zweifellos blieb. Zur Erklärung dieser Erscheinungen nahm nun Wüllner eine Abhandlung Zöllner's über den Einfluss der Temperatur und der Dichtigkeit auf die Spectra glühender Gase zu Hülfe. Zöllner [2]) entwickelte nämlich allgemein aus dem Kirchhoff'schen Gesetz über das Verhältniss der Absorption und Emission die Folgerung, dass das Helligkeitsverhältniss zweier benachbarten Stellen im Spectrum von der Temperatur, der Dichte, dem Absorptionscoëfficienten und der Dicke der leuchtenden Schichten und zwar von der letzteren so abhängt, dass mit der Vermehrung dieser Schichten das Spectrum die Tendenz zeigt, in ein continuirliches überzugehen [3]). Dieser Einfluss der Dicke der strahlenden Schicht ist es, der nach Wüllner das Auftreten der verschiedenen Spectren in den Geissler'schen Röhren bedingt [4]). Bei der sich mehr oder weniger durch die ganze Gasmasse ausbreitenden funkenlosen Entladung leuchtet immer eine relativ dicke Schicht des Gases, es müssen also in dem Spectrum des Lichtes alle jene Wellenlängen auftreten, welche das Gas bei der vorhandenen Temperatur aussenden kann. Bei der relativ geringen Stärke müssen sich aber die geringsten Unterschiede in dem Emissionsspectrum für das Licht verschiedener Wellenlängen erkennen lassen. Im Funken sind es immer unter allen Umständen nur sehr wenige Molecüle (also eine sehr dünne Schicht des Gases) die leuchten, eben nur die direct von der Funkenladung getroffenen; deshalb können in dem Spectrum nur einzelne helle Linien auftreten, es sei denn, dass die Temperatur des Funkens eine äusserst hohe ist, so dass derselbe ein continuirliches Spectrum liefert. Ångström wandte sich gegen diese Erklärung noch einmal in einer grösseren Arbeit, die erst 1875 nach seinem Tode von seinem Mitarbeiter

---

[1]) Kundt (Pogg. Ann. CXXXV, S. 315, 1868) fand auch bei Blitzen sowohl Banden- als Linienspectren; letztere traten besonders bei deutlichen Zickzackblitzen auf, doch kamen beide Arten einige Male auch bei demselben Blitze rasch hinter einander vor.

[2]) Pogg. Ann. CXLII, S. 88, 1871.

[3]) Durch Steigerung des Druckes kann man die Unterschiede in den Intensitäten benachbarter Stellen des Spectrums zum Verschwinden bringen, dagegen umkehren lassen sich diese Verhältnisse, so dass an Stelle eines früheren Minimums ein Maximum und umgekehrt tritt, nur durch Temperaturveränderungen (Pogg. Ann. CXLII, S. 102).

[4]) Pogg. Ann. CXLIX, S. 103, 1873.

R. Thalén herausgegeben wurde [1]). Er hielt darin streng an der Ansicht fest, dass ein einfacher Stoff (so lange seine Natur sich nicht ändert) auch nur ein einziges Spectrum und ein glühendes Gas nur ein Linienspectrum haben kann. Er blieb auch dabei, dass die vielfachen Spectren, welche man an Wasserstoff und anderen elementaren Gasen beobachtet hat, bis auf je eins immer Spectren von Verbindungen oder wenigstens von molecular zusammengesetzteren Modificationen sind. Im Uebrigen aber gab er zu, dass auch ein einfacher Körper unter gewissen Umständen verschiedene Spectren zeigen kann, dann nämlich, wenn der Stoff in verschiedenen allotropischen Modificationen existirt. Solche allotropische Modificationen werden jedenfalls jede ihr eigenes Absorptionsspectrum haben; ob freilich diese Unterschiede sich auch im Flammenspectrum zeigen werden, das hängt davon ab, wie viele der Modificationen die Temperatur des Glühens ohne Zersetzung ertragen. So wird der Sauerstoff zwei verschiedene Absorptionsspectren haben, das eine dem gewöhnlichen Sauerstoff, das andere dem Ozon angehörig; für den glühenden Sauerstoff giebt es aber, da sich das Ozon beim Glühen zersetzt, nur ein einziges Spectrum. Was den Unterschied der Spectren in den verschiedenartigen elektrischen Entladungen betrifft, so zerstäubt die Funkenentladung die Körper in ihre kleinsten Partikelchen und zersetzt sie auch chemisch. Darum erscheint in der Funkenentladung immer das Spectrum des Elements, während sich bei der continuirlichen Entladung auch Spectren der Verbindungen zeigen.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

Trotzdem die Gegner an den Gegensätzen ihrer Meinungen festhielten, so war doch eine Klärung der strittigen Sache und damit auch eine Annäherung der Ansichten entschieden eingetreten. Dass eine Veränderung der Spectren auch bei den Elementen möglich und dass die wirkenden Ursachen dieser Veränderungen auf Veränderungen der Temperatur, des Druckes, der Absorption und der molecularen Constitution zurückzuführen seien, war anerkannt. Nur darüber, wie weit die Wirkung jeder dieser Ursachen reichen könnte, gingen die Meinungen auseinander, und darüber war wohl ein Entscheid in Bälde noch nicht zu erwarten. Als die am ersten zu verfolgende und auch wohl wichtigste Idee dürfte die der Abhängigkeit der Spectren von der molecularen Constitution der lichtaussendenden oder absorbirenden Stoffe erscheinen. War die Art des Spectrums durch die Beschaffenheit des Molecüls so bedingt, dass schon eine allotropische Modification des Stoffes eine Aenderung des Spectrums verursachte, so durfte man bei höchster Dissociation der Stoffe (durch höchste Temperaturgrade oder durch stärkste elektrische Kräfte) auch

[1]) Nova Acta Soc. Upsal. (3) IX, 1875. Referat in den Beiblättern zu Pogg. Ann. I, S. 36, 1877.

Spectral-analyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

wohl das Auftreten von Atomspectren neben oder nach den Molecularspectren erwarten. Ja noch mehr, hing die Einfachheit des Spectrums von der Einfachheit der Constitution des Molecüls ab, so liess sich auch schliessen, dass die Zusammensetzung der Spectren aus mehreren einfachen Linien auf eine Zusammensetzung unserer sogenannten Elemente aus noch einfacheren Stoffen hindeute, deren jeder ein absolut einfaches Spectrum, das nur aus einer einzigen Linie gebildet, ergäbe. Der Erste, welcher diese Gedanken aufnahm und weiter verfolgte, war N. Lockyer. Noch im Jahre 1873 [1]) kam dieser durch eine Vergleichung der Spectren von chemischen Verbindungen und von künstlichen Mischungen zu dem Ergebniss, dass jeder zusammengesetzte Körper gerade so wie jeder einfache sein besonderes Spectrum habe, dass diese Spectren vorzugsweise aus Banden beständen und dass diese Bandenspectren bei grösserer Complicirtheit der Verbindung sich den continuirlichen, bei grösserer Einfachheit aber den Linienspectren näherten. In einer folgenden Arbeit im Jahre 1874 [2]) ging er dann näher auf die Beziehungen zwischen der Constitution der Körper und den spectroskopischen Erscheinungen ein. Er wies darauf hin, dass Linienspectren nur da auftreten, wo nach den Ansichten der neueren Gastheorie die Molecüle sich in freier Bewegung befinden, während sonst nur continuirliche Spectren zum Vorschein kommen. Nimmt man z. B., so sagt er, Wasserstoff und beobachtet das Spectrum, nachdem man eine Quecksilberluftpumpe stundenlang hat arbeiten lassen, so besteht es aus einer einzelnen Linie. Füllt man aber die Röhre wieder mit Gas bei gewöhnlichem Atmosphärendruck, verdoppelt den Druck oder steigert ihn noch mehrfach, so wird nicht nur die zuerst erschienene grüne Linie immer dicker, sondern es erscheinen auch mehr sich weiter verdickende Linien, bis bei 20 Atmosphärendruck das Spectrum von dem continuirlichen eines festen Körpers nicht mehr zu unterscheiden ist. Bei den Leichtmetallen scheint die Annäherung vom Linienspectrum zum continuirlichen vor Allem durch die Verbreiterung, bei den Schwermetallen durch die Vermehrung der Linien zu geschehen. Schliesslich kommt Lockyer zu der Ueberzeugung, dass die Linienspectren von den freien Atomen herrühren, die Bandenspectren aber durch

[1]) Proc. Roy. Soc. XXI, p. 83, 285 und 508, 1873: Researches in spectrum analysis in connexion with the spectrum of the sun. Die hier gegebenen Sätze finden sich vor Allem in der zweiten der obigen Abhandlungen. Lockyer giebt hier auch die Idee, dass in den Spectren verschiedener Metalle coincidirende Linien nicht in den verschiedenen Spectren in gleicher Weise auftreten können, führt aber hier diese Coincidenzen noch auf Verunreinigung des einen Metalls mit einem anderen zurück. — Joseph Norman Lockyer, geb. am 17. Mai 1836 in Rugby, Herausgeber der Zeitung „Nature“ in London.

[2]) Nature X, p. 69 und 89, 1874: Atoms and Molecules spectroscopically considered. Ibid., p. 154: On the Evidence of Variation in Molecular Structure.

die Molecüle oder durch Anhäufungen von Molecülen erzeugt werden.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Moleculen, c. 1859 bis c. 1880.

Lockyer's Ansicht von den eigenen Spectren der chemischen Verbindungen fand vielfachen Beifall. James Moser griff 1877 [1]) auf die Aeusserung von Ångström und Thalén zurück, dass man nach dem Kirchhoff'schen Absorptionsgesetz die spectralen Eigenthümlichkeiten eines Stoffes, wie an den Flammen- auch an den Absorptionsspectren beobachten könne und dass diese letzteren gerade zur Beobachtung der verschiedenen Spectren allotropischer Modificationen besonders geeignet seien, weil sie keine anderen als die gewöhnlichen Temperaturen erforderten. Nach Untersuchung einer grossen Anzahl solcher Absorptionsspectren kam dann Moser wie Lockyer zu der Ueberzeugung, dass jede chemische Verbindung ihr eigenes Spectrum habe, dass nur unbedeutende Veränderungen der Spectren durch Vergrösserung der leuchtenden Massen und Erhöhungen der Temperatur erklärt werden könnten und dass wesentliche Aenderungen derselben allein durch Aenderungen der chemischen Beschaffenheit möglich seien. Auch in Betreff der Banden- und Linienspectren und ihre Zurückführung auf Molecül- und Atomspectren stimmte er Lockyer bei. Zu entsprechenden Resultaten gelangte um dieselbe Zeit auch G. Ciamician [2]), der ausserdem noch einen Zusammenhang zwischen den Spectren chemisch verwandter Elemente suchte. Eine Vergleichung der Spectren von einunddreissig verschiedenen Elementen führte ihn in dieser Richtung zu den folgenden Sätzen: Die Spectrallinien chemisch verwandter Elemente entsprechen einander einzeln oder gruppenweise, so dass jede natürliche Gruppe von Elementen ihr eigenes Spectrum hat, welches bei einzelnen Gliedern derselben nur dadurch verschieden erscheint, dass die homologen Linien nach dem einen oder dem anderen Ende des Spectrums hin verschoben sind; die Zu- oder Abnahme der Wellenlängen homologer Linien bei chemisch verwandten Elementen hängt mit der Intensität ihrer chemischen Kraft zusammen, so dass der grösseren chemischen lebendigen Kraft auch eine grössere Wellenlänge entspricht [3]).

Dass übrigens Ångström den Meinungen Lockyer's sich günstig zeigte [4]), war ebenso natürlich, wie dass Wüllner denselben wider-

[1]) Pogg. Ann. CLX, S. 177, 1877. — James Moser, geb. 1852, Docent der Physik an der Universität Wien.

[2]) Anzeiger der K. Akademie der Wissenschaften in Wien, math.-naturw. Classe, XIV, S. 181, 1877.

[3]) Aehnliche Ideen hatte Lecoq de Boisbaudran schon seit dem Jahre 1865 entwickelt. Nach ihm werden die verschiedenen Arten der Spectren eines Elements durch verschiedenartige Bewegungen der Molecüle, wie Rotationen, Schwingungen oder fortschreitende Bewegungen verursacht. Die Verschiebungen der homologen Linien bei verwandten Elementen entsprechen aber nicht den grösseren oder kleineren chemischen Kräften, sondern der grösseren oder geringeren Schwere der Molecüle. (Compt. rend. LXIX, p. 445, 606, 657, 694, 1869.)

[4]) Siehe auch Pogg. Ann. Jubelband, S. 429, 1874.

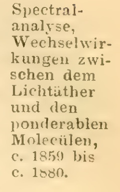
Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Moleculen, c. 1859 bis c. 1880.

strebte. In einer Arbeit vom Jahre 1879 [1]) constatirte der Letztere, dass das Bandenspectrum des Stickstoffs bei hinreichend dünnen Schichten und hinreichend geringem Druck durch Steigerung der Temperatur ganz allmälig in ein Linienspectrum übergeführt werden könne und dass sich die vollständige Umkehrung der Helligkeitsverhältnisse deutlich beobachten lasse. Er schloss daraus aufs Neue, dass die Art des Spectrums nur von der Temperatur, der Dichte und der Dicke der lichtaussendenden Gasschichten abhängig und dass also zur Erklärung der verschiedenartigen Spectren keine neue Hypothese, wie die der Dissociation der Molecüle u. s. w., nöthig sei.

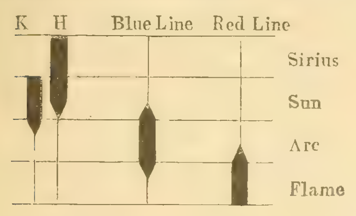
Lockyer aber entwickelte gerade nach dieser Richtung seine Theorie mit äusserster Kühnheit in zahlreichen Arbeiten weiter. Er hatte früher entsprechend seiner Theorie beobachtet, dass alle verschiedenen Calciumverbindungen auch ihre eigenen verschiedenen Spectren haben und dass mit steigender Temperatur alle diese Spectren sich mehr und mehr dem gemeinsamen Linienspectrum des Calciummetalles nähern. Nun aber bemerkte er, dass mit weiter wachsender Temperatur auch dieses Linienspectrum noch Veränderungen erleiden kann. Bei der Temperatur des elektrischen Bogenlichts ist im Blauen die Calciumlinie von grosser Intensität, die violetten Linien $H$ und $K$ aber sind noch dünn; in dem Spectrum der Sonne dagegen ist die blaue Linie schwach, und die Linien $H$ und $K$ sind sehr breit ausgebildet. Da Lockyer ähnliche Erscheinungen auch bei anderen Metallen bemerkte, so kam er auf die Idee, dass diese Veränderungen der Linienspectren von chemischen Zersetzungen herrühren möchten, welche auch unsere Elemente bei den hohen Temperaturen der leuchtenden Gestirne noch erleiden könnten. Danach würden dann auf diesen Gestirnen gar nicht mehr unsere Elemente als solche, sondern nur noch deren Grundstoffe im ungebundenen Zustande vorkommen und es wäre nicht unmöglich, dass auf einzelnen Gestirnen gar nicht alle zu einem unserer Elemente gehörigen Grundstoffe, sondern nur einzelne davon sich vorfänden. Damit übereinstimmend constatirte auch Lockyer an Sternspectren, die von Huggins aufgenommen waren, dass wirklich die Calciumlinien $H$ und $K$ nicht in allen Sternspectren in gleicher Weise vertheilt sind und dass im Spectrum des Sirius wie in dem des Sternes $\alpha$ Lyrae die Linie $H$ allein oder fast allein sichtbar ist [2]).

[1]) Wiedemann's Ann. VIII, S. 590, 1879.

[2]) Diese Schlüsse, die Frucht mehrjähriger Arbeiten, fasste Lockyer zunächst wieder in einer Arbeit: Discussion of the working hypothesis that the so-called elements are compound bodies, zusammen, die in den Proc. of the Roy. Soc. XXVIII, p. 157, 1878, sowie in Nature XIX, p. 197 und 225, auch übersetzt in den Beibl. zu Wiedem. Ann. III, S. 88 erschien. Die beigefügte Figur verdeutlicht die Erscheinung der Calciumlinien in den verschiedenen Spectren (Proc. of the Roy. Soc. XXVIII, p. 171).


Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

Lockyer vermochte auch sogleich noch Weiteres über die Zusammensetzung der Elemente aus ihren Urbestandtheilen anzugeben. Thalén hatte schon früher bemerkt, dass in den Spectren verschiedener Metalle einzelne Linien oder Liniengruppen ganz oder doch wenigstens nahezu zusammenfallen. Lockyer hatte zuerst gemeint, dass eine solche Gruppe nur einem Metall eigenthümlich sein und in dem Spectrum des anderen nur durch Verunreinigungen erscheinen könnte. Jetzt kam er zu der Ueberzeugung, dass solche Linien doch in mehreren Metallspectren coincidiren könnten und dass solche Coincidenzen auf die gemeinsamen Urbestandtheile der betreffenden Metalle zurückzuführen wären. Um die gemeinsamen, die sogenannten „basischen Linien" genau feststellen zu können, verglich Lockyer sehr stark vergrösserte Theile von Metallspectren mit den entsprechenden Theilen des Sonnenspectrums [1]), und da im Spectrum des Voltabogens die Eisenlinien besonders denen im Sonnenspectrum sehr ähnlich waren, so richtete er seine Beobachtungen zuerst vor Allem auf diese. Die zur Erkennung der verschiedenen Dissociationen der Elemente nöthigen Verschiedenheiten der Temperaturen glaubte er in den Sonnenflecken und Protuberanzen zu finden, und wirklich bemerkte er bei sehr zahlreichen Beobachtungen meist eine starke Verschiedenheit der Linien. Leider war diese Verschiedenheit eine durchaus unregelmässige, und nur dadurch zeigten sich gewisse basische Linien an, dass ein Theil der Linien in den Flecken trotz der oft geringen Intensität immer verbreitert erschien, welcher Theil von den Eisenlinien, die im Dampf des Metalles sichtbar sind, höchstens $^1/_{10}$ betrug. Die Dissociation unserer Elemente, speciell des Eisens im Allgemeinen, wurde aber gerade durch diese Verschiedenheiten der Erscheinung der Linien in den verschiedenen Partien der Sonne noch weiter festgestellt. Denn nicht bloss bemerkte Lockyer, dass einzelne Eisenlinien in einigen Flecken vorkamen, die in anderen fehlten, er constatirte auch, dass verschiedene Linien in einem Flecke durch ihre verschiedene Verschiebung im Spectrum ganz verschiedene Bewegungen der leuchtenden Massen anzeigten, und zwar nicht bloss verschieden schnelle Bewegungen, sondern auch solche von entgegengesetzter Richtung. Er meinte danach mit Sicherheit schliessen zu können, dass in der Sonne das Eisen wenigstens nicht als solches, sondern




[1]) Die Vergrösserung der Spectren war so stark, dass das ganze Spectrum, in derselben Grösse wie die Theile hergestellt, $^1/_{16}$ englische Meile lang gewesen sein würde. Lockyer benutzte zur genaueren Beobachtung immer Photographien der Spectren.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

nur in seinen Urbestandtheilen vorkomme und dass diese Urbestandtheile nicht in allen Flecken in gleicher Anzahl und in gleicher Bewegung vorhanden wären[1]). Diesen weitgehenden Schlüssen Lockyer's gegenüber verhielt man sich indessen meist noch skeptisch und mehrere Physiker bemühten sich, Lockyer's merkwürdige Beobachtungen auch ohne eine Dissociation unserer Elemente zu erklären. Das vermeintliche alleinige Auftreten einer Calciumlinie $H'$ ohne die folgende $H''$ in den Spectren der weissen Sterne leitet Herm. W. Vogel daraus ab[2]), dass diese Linie hier gar keine Calciumlinie, sondern eine naheliegende des Wasserstoffs ist. Liveing und Dewar[3]) hatten nämlich beobachtet, dass gewisse Spectrallinien einzelner Substanzen nur bei Mischung derselben mit anderen Substanzen auftreten und erklärten danach das Fehlen gewisser Eisen- und Calciumlinien in Sternspectren durch das Fehlen der bedingenden Beimischungen. In ähnlicher Weise erklärte dann Vogel auch die Verschiebung einzelner Spectrallinien, die nach Lockyer eine verschiedene Bewegung der leuchtenden Stoffe anzeigen soll. Hagenbach bemerkte, dass die Absorptionsspectren flüssiger Lösungen durch die Art des Lösungsmittels beeinflusst werden; Kundt zeigte dementsprechend, dass helle Linien von Gasen durch Beimengung anderer nicht leuchtender oder ein continuirliches Spectrum gebender Dämpfe eine Verschiebung erleiden können. Vogel[4]) schrieb danach die von Lockyer beobachtete Verschiebung der Eisenlinien nicht der Bewegung, sondern verschiedenen Beimischungen stark zerstreuender Gase zu den Eisendämpfen an den verschiedenen Stellen der Sonne zu und hielt danach die Annahme einer auf der Sonne vorhandenen Zersetzung unserer Elemente in einfachere Urbestandtheile zur Zeit noch für unnöthig.

So muss dieser Versuch, die von vielen Chemikern schon längst als wahrscheinlich anerkannte Hypothese von der Zusammengesetztheit unserer sogenannten Elemente durch physikalische Beobachtungen empirisch sicher zu stellen, vor der Hand noch als unvollendet angesehen werden, und vielleicht noch für längere Zeit; denn fast scheint es, als sei in der letzten Zeit auf dem Gebiete der Spectralanalyse eine Pause der Ermüdung eingetreten, die man zu einer gewissen Sammlung und zu einem ruhigen Ueberblicke über das Erfahrene benutzen möchte.

Ohne uns hier weiter auf eine Besprechung der vielen und immer noch erfolgreichen Spectraluntersuchungen der Gestirne einzulassen, müssen wir doch noch der Benutzung der Doppler'schen Hypothese zur Bestimmung der Eigenbewegung der kosmischen Materien mit Hülfe

---

[1]) Compt. rend. XCII, p. 904, 1881. Nature XXIV, p. 267, 296, 315, 365 und 391, 1881: Solar physics. The chemistry of the Sun. Proc. of the Roy. Soc. XXXI, p. 348; XXXII, p. 203; XXXIII, p. 154 u. s. f.

[2]) Sitzungsber. der Berliner Akad. 1880, S. 192; Nature XXI, p. 410, 1880.

[3]) Proc. of. the Roy. Soc. XXVII, p. 350, 1878.

[4]) Sitzungsber. der Berliner Akad. 1882, S. 905.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

des Spectralapparates gedenken, weil sie ein weiteres Zeichen des Erfolges der kinetischen Theorien der Materie ist. Doppler hatte seinen Satz von dem Einfluss der Bewegung eines Wellen aussendenden Mediums auf die Wirkung dieser Wellen in erster Linie zur Erklärung der Farben der Doppelsterne verwandt; die Physiker aber hatten seine Anwendung bisher nur für akustische Fragen für möglich gehalten. Fizeau zwar hatte 1848 in der philomathischen Gesellschaft und 1850 in der Pariser Akademie ausgesprochen [1]), dass eine sehr schnelle Annäherung oder Entfernung eines leuchtenden Körpers sich durch eine Verschiebung der Spectrallinien bemerkbar machen müsse, aber die Aeusserung hatte keine weitere Beachtung gefunden. E. Mach [2]) griff 1861 ganz auf die Doppler'schen Ideen zurück; er leitete die Farben der Doppelsterne wieder aus ihren Bewegungen ab und hielt es für möglich, auch umgekehrt die Farbe zur Bestimmung der Bahnelemente dieser Sterne mit zu benutzen. Angriffen gegenüber gab er zu, dass die kosmischen Geschwindigkeiten zur Erzeugung dem Auge erkennbarer Farbenveränderungen zu klein sein möchten, fügte aber bei: „Uebrigens muss ich bemerken, dass Messungen am Spectrum wohl auch dann noch zu Resultaten führen könnten, wenn durch das Auge keine Farbenveränderungen mehr wahrzunehmen sind“ [3]). Eine eigenthümliche Idee hatte Klinkerfues [4]) über die Anwendung des Doppler'schen Princips zur Bestimmung kosmischer Geschwindigkeiten. Er behauptete, dass von der bewegten Lichtquelle zwar in einem bestimmten Zeitintervall mehr Impulse als von der ruhenden in unser Auge gelangten, dass aber damit die Wellenlänge und die Farbe des betreffenden Lichtes nicht geändert werde, weil das Roth bei seiner verkürzten Wellenlänge sich nun aus dem Ultraroth ergänze, während das Violett mit verkürzter Wellenlänge in das Ultraviolett übergehe. Dagegen müsse die Bewegung der Lichtquelle sich in einer Verschiebung des ganzen Spectrums zeigen, und an dem farblosen Strahle, den ein achromatisches Prisma giebt (womit Klinkerfues immer beobachtete), müsse sich bei einer bewegten Lichtquelle eine andere Brechung zeigen, als bei einer ruhenden. Die Veränderung der Brechung hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der die Lichtphasen im Strahle fortschreiten. Ist nun die Translationsgeschwindigkeit des Lichtes in einem Mittel $v$, in einem anderen $v_1$, die Geschwindigkeit der Lichtquelle selbst $g$, so sind die Geschwindigkeiten, mit denen die Lichtphasen in den beiden Mitteln fortschreiten, resp. $v + g$ und $v_1 + g$, der Brechungsindex wird

[1]) L'Institut Nr. 784, 1849; Prioritätsreclamation in Compt rend. LXIX, p. 743, 1869.

[2]) Pogg. Ann. CXII, S. 58, 1861; CXVI, S. 333, 1862. — E. Mach, geb. am 18. Februar 1838, Prof. der Physik an der Universität Prag.

[3]) Pogg. Ann. CXVI, S. 338.

[4]) Göttinger Nachr. 1865, S. 157, 210, 376; 1866, S. 33. — E. Fr. Wilh. Klinkerfues, 1827—1884, Director der Göttinger Sternwarte.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

also statt $\frac{v}{v_1}$ bei der bewegten Lichtquelle $\frac{v+g}{v_1+g}$, und daraus liesse sich die Geschwindigkeit $g$ berechnen. Die Messungen, welche Klinkerfues zu diesem Zwecke anstellte, führten jedoch zu keinem Resultate. L. Sohnke wies darum im Mai 1867 [1]) bei einer Besprechung der Klinkerfues'schen Arbeiten wieder direct auf die Beobachtung der Spectrallinien hin. „Besässe ein Stern, so sagt er, dasselbe Licht wie die Sonne, wäre aber in starker Bewegung begriffen, so müssten sich die dunklen Linien des Spectrums ein wenig gegen ihre Lage im Sonnenspectrum verschoben zeigen, und aus der Grösse der Verschiebung könnte man dann auf die Geschwindigkeit des Sternes schliessen" [2]). Secchi [3]) indessen versuchte in demselben Jahre noch einmal vergebens die Fixsternspectren in dieser Richtung zu benutzen, während W. Huggins [4]) fast gleichzeitig zu dem erstrebten Ziele kam. Der Letztere beobachtete nunmehr im Spectrum des Sirius im Vergleich mit dem Spectrum einer Geissler'schen Röhre eine Verschiebung der Wasserstofflinie $F$ um 0,04 Theile seiner Mikrometertheilung und berechnete daraus eine Zunahme der Entfernung des Sirius von der Erde um 47,3 km und also mit Berücksichtigung der Bewegung der Erde eine Eigenbewegung des Sirius in der Richtung von der Erde weg von 66,6 km in einer Secunde. Um die Vergleichung der Sternspectren mit den Spectren künstlicher Lichter unnöthig zu machen und damit auch die Beobachtung lichtschwächerer Fixsterne zu ermöglichen, construirte Zöllner sein Reversionsspectroskop [5]), dessen Einrichtung die folgende war: Die durch einen Spalt oder eine Cylinderlinse erzeugte Lichtlinie befand sich im Brennpunkte einer Linse, welche die zu zerstreuenden Strahlen zunächst parallel machte. Danach passirten die Strahlen zwei Amici'sche Prismensysteme à vision directe [6]), die dergestalt neben einander befestigt waren, dass jedes die eine Hälfte der aus dem Collimatorobjectiv tretenden Strahlenmasse hindurchliess, und deren Kanten auf entgegengesetzten Seiten lagen, so dass die gesammte Strahlenmasse in zwei Spectra von entgegengesetzter Richtung zerlegt wurde. Das Objectiv des Beobachtungsfernrohres war dann senkrecht zu den horizontal gelegenen, brechenden Kanten in zwei Hälften zerschnitten, die sowohl

1) Pogg. Ann. CXXXII, S. 279, 1867.

2) Ibid., S. 292.

3) Compt. rend. LXVI, S. 398, 1867.

4) Phil. Trans. 1868, p. 529. — William Huggins, geb. am 7. Februar 1824 in London, Astronom.

5) Pogg. Ann. CXXXVIII, S. 32, 1869.

6) Der Pariser Optiker J. G. Hofmann sagt (Cosmos XXII, p. 384, 1863), dass er zuerst ein Spectroskop à vision directe praktisch ausgeführt, dass aber die Idee dazu von Amici stamme. (Giov. Batt. Amici, 1786—1863, Prof. d. Astronomie in Florenz.)

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

parallel zu der Schnittlinie als auch senkrecht zu derselben mikrometrisch bewegt werden konnten. Durch diese Einrichtung zeigte sich also jede Veränderung im Spectrum, die sich in einer Verschiebung der Linien äusserte, verdoppelt, indem sich der Einfluss derselben in jedem Spectrum im entgegengesetzten Sinne geltend machte. J. C. Maxwell hatte, wie Zöllner angiebt, in Uebereinstimmung mit früheren Berechnungen von F. Eisenlohr abgeleitet, dass einer mittleren Geschwindigkeit der Erde von vier Meilen eine Verschiebung der Linien im Spectrum um den zehnten Theil der Entfernung der Natronlinien entsprechen würde, und hatte danach (allerdings noch vor der Arbeit von Huggins) die Messung einer solchen Verschiebung „mit unseren Instrumenten" für unmöglich erklärt. Zöllner aber fand nun, dass man mit seinem Reversionsspectroskop den Abstand der beiden $D$-Linien bis auf $^1/_{226}$ seiner Grösse messen und danach kosmische Geschwindigkeiten bestimmen könnte, welche Bruchtheile von Meilen nicht übersteigen. Trotzdem aber ist diese spectroskopische Bestimmung der Eigenbewegung der kosmischen Körper immer eine sehr difficile und darum auch fragwürdige geblieben, weil störende Einwirkungen, vor Allem die Erwärmung der Prismen, bei der Kleinheit der zu beobachtenden Veränderungen von zu starkem Einfluss und nicht zu beseitigen waren. Gerh. Krüss[1]) fand eine ganz beträchtliche Verschiebung der Spectrallinien schon bei geringen Veränderungen der Zimmertemperatur, und zwar bei verschiedenen Prismen nach verschiedenen Seiten hin, und auch G. Müller[2]) constatirte eine Abhängigkeit der Brechung wie der Dispersion des Lichtes von den Veränderungen der Temperatur.

Die Spectralanalyse setzte voraus, dass die gebräuchlichen Prismen die Lichtstrahlen, welche durch sie hindurchgehen, nicht weiter verändern, als dass die verschiedenfarbigen Strahlen verschieden stark abgelenkt und so aus einander gelegt werden. Zwar übersah man nicht, dass alle Substanzen immer einen Theil des Lichtes und verschiedene Substanzen auch verschiedene Antheile absorbiren, aber man glaubte doch annehmen zu dürfen, dass die Absorption keinen weiteren Einfluss auf das durchgelassene Licht ausüben könne. Man blieb danach in der Vorstellung einig, dass die Grösse der Brechung und der Farbenzerstreuung zwar mit der optischen Dichte der Substanzen wachsen und abnehmen, aber von der Wellenlänge doch so abhängig sein müsse, dass eine grössere Wellenlänge auch immer eine grössere Brechbarkeit und umgekehrt bedinge. Dieser letztere Satz folgte auch aus den bisherigen theoretischen Entwickelungen, die immer eine alleinige Abhängigkeit der Brechung von den optischen Dichten der in Frage kommenden Medien und den Wellenlängen der betreffenden Lichstrahlen zu Grunde legten. Dem gegenüber zeigten in der

[1]) Ber. der Deutsch. chem. Ges. XVII, S. 2732, 1884.

[2]) Beibl. zu Wiedem. Ann. X, S. 279, 1886.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

letzten Periode der Physik neue Beobachtungen, dass diese Vorstellung von der Wechselwirkung zwischen den Aetherschwingungen und den Bewegungen der ponderablen Molecüle eine zu enge gewesen und dass auch hier die Bewegungen der ponderablen Materie von grösserem Einfluss seien, als man bis dahin geglaubt.

Im Jahre 1862 fiel es Le Roux[1]) auf, dass der Joddampf, der den mittleren Theil des Spectrums absorbirt und nur die äussersten rothen und blauen Strahlen hindurchlässt, die letzteren im Gegensatz zu anderen Körpern weniger stark bricht als die ersteren. Er bezeichnete diese Art der Brechung schon damals mit dem auch heute gebräuchlichen Namen der anomalen Dispersion, fand aber keine weitere Beachtung. Erst acht Jahre später folgte die Veröffentlichung einer anderen, hierher gehörigen Beobachtung durch C. Christiansen[2]). Als dieser einen hellen Spalt durch ein mit Fuchsinlösung gefülltes Hohlprisma betrachtete, sah er die Spectralfarben statt in der gewöhnlichen Reihenfolge vom Roth bis zum Violett, in der theilweise umgekehrten Ordnung Violett, Roth und Gelb. Der Brechungsexponent des Fuchsins nahm danach von der Fraunhofer'schen Linie $B$ bis zur Linie $D$ wie gewöhnlich zu, fiel dann aber bis zur Linie $G$ sehr rasch ab, um darüber hinaus wieder etwas zu wachsen. Nach Christiansen nahm A. Kundt[3]) direct das Problem der anomalen Dispersion in seiner allgemeinsten Bedeutung auf und stellte auch sogleich die allgemeinen Gesetze derselben empirisch fest. Er prüfte zuerst eine ganze Reihe von Körpern, die, dem Fuchsin ähnlich, wie dieses oberflächlichen Metallglanz zeigen, und dehnte dann diese Prüfung auf die Substanzen mit sogenannten Oberflächenfarben[4]) überhaupt aus. So untersuchte er in erster Reihe Anilinblau, Anilinviolett, Anilingrün, Indigo (in rauchender Salpetersäure gelöst), Indigocarmin, Murexid (in Kalilauge gelöst), Cyanin, übermangansaures Kalium, dann aber

---

[1]) Dispersion anomale de la vapeur d'iode, Compt. rend. LV, p. 126, 1862; auch Pogg. Ann. CXVII, S. 659. In einer vorhergehenden Abhandlung (Compt. rend. LI, p. 171, 1860) hatte Le Roux nur festgestellt, dass, wenn er ein Prisma mit Joddampf füllte, das Spectrum einer stark beleuchteten Spalte aus zwei verschiedenen über einander gelagerten Theilen, einem blauen und einem violetten, bestand. Danach erst bemerkte er, dass diese Theile die umgekehrte Reihenfolge wie in dem gewöhnlichen Spectrum hatten.

[2]) Pogg. Ann. CXLI, S. 479, 1870; CXLIII, S. 250, 1871; CXLVI, S. 154, 1872.

[3]) Ueber die anomale Dispersion der Körper mit Oberflächenfarben, Pogg. Ann. CXLII, S. 163; CXLIII, S. 149 u. 259; CXLIV, S. 128, 1871; CXLV, S. 67 und 164, 1872. Beziehungen zwischen der Dispersion und Absorption des Lichtes, Pogg. Ann., Jubelbd., S. 615, 1874. — A. Kundt, geb. am 18. November 1839, Prof. der Experimentalphysik in Berlin.

[4]) Das sind Medien, die für einzelne Lichtstrahlen durchlässig sind, andere aber mit metallischem Glanze reflectiren. Dale und Baden Powell gaben 1846 schon an, dass Indigo und Berliner Blau, die zu den Stoffen mit Oberflächenfarben gehören, auch eine deutliche elliptische Polarisation ähnlich den Metallen zeigen. (Pogg. Ann. CXLII, S. 165.)

auch Alizarin (in Kalilauge), Orsellin, Lackmus, Jod, Blauholzextract, Rothholzextract, Sandelholz, Alkannawurzel, Blut, Hämatin, Chlorophyll u. s. w. Er fand durch diese Untersuchungen, dass diejenigen Körper, welche einzelne Farben sehr stark reflectiren, dieselben auch sehr stark absorbiren, so dass im Spectrum des durch solche Körper hindurchgegangenen Lichtes die Oberflächenfarben aus zweierlei Gründen fehlen müssen. Die Brechungsexponenten der Körper für diese Farben lassen sich im Spectrum nicht direct beobachten, es steht aber zu erwarten, dass dieselben ausnahmsweise gross oder klein sind[1]) und dass die Brechungsexponenten der angrenzenden Farben sich diesen Maxima oder Minima schnell und bedeutend annähern. Dieses schnelle Annähern der einen Absorptionsstreifen begrenzenden Farben an anomale Maxima und Minima der Brechung wäre es also, was man als anomale Dispersion beobachtete. In der That constatirte Kundt überall da, wo eine besondere Absorption einzelner Farben auftrat, auch eine Anomalität der Dispersion, und für die Abhängigkeit der Dispersion von der Absorption fand er als allgemeines Gesetz, dass vor jedem Absorptionsstreifen, wenn man sich von der Seite der grösseren Wellenlänge (in Luft) her nähert, die Brechung sehr schnell wächst und bei umgekehrter Richtung sehr schnell abnimmt. Bei gehöriger Concentration der dispergirenden flüssigen Lösung kann dann das anomale Wachsen und Abnehmen des Brechungsexponenten so weit gehen, dass die Brechung des Spectraltheils vor dem Absorptionsstreifen stärker wird als die des nachfolgenden Theiles.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

Kundt sprach in diesen Arbeiten schon aus, dass wohl auch einzelne mit sehr starken Absorptionsfähigkeiten begabte Gase und Dämpfe anomale Dispersionen zeigen müssten, bezweifelte aber damals noch die Möglichkeit von deren Beobachtung[2]). Später kam

[1]) Ueber die Ausbildung dieser Ideen sagt Kundt (Pogg. Ann. CXLII, S. 163): „Mit Zugrundelegung der Versuche von Jamin über die elliptische Polarisation des von den Metallen reflectirten Lichtes und der neueren Versuche von Quincke ergeben die Formeln von Cauchy, Beer und Eisenlohr für einzelne Metalle, wie z. B. Silber und Gold, einen Brechungsexponenten kleiner als 1, also eine Geschwindigkeit (des Lichtes in denselben), grösser als im luftleeren Raume. Zugleich zeigt die Cauchy'sche Theorie, gestützt auf die Jamin'schen Versuche, dass der Brechungsexponent der Metalle von dem Einfallswinkel abhängt und dass in den meisten Metallen die Dispersion eine umgekehrte von derjenigen in den durchsichtigen Körpern ist, dass Licht kürzerer Wellenlänge also weniger gebrochen werden muss, als dasjenige längerer. Der Einzige, der bis jetzt versucht hat, diese Resultate auf directem Wege nachzuweisen, ist wohl Quincke gewesen. Interferenzerscheinungen bei Licht, das zum Theil durch Metalle, zum Theil durch Luft gegangen war, gaben Quincke für die mit blauer Farbe durchsichtigen Modificationen von Silber und Gold Brechungsexponenten kleiner als 1.“

[2]) Pogg. Ann. CXLIV, S. 132.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

er zufällig zu einer solchen[1]). Als er mit seinem Assistenten Kohlrausch, um für eine Vorlesung den Versuch der Umkehrung der hellen Natronlinie vorzubereiten, durch ein verticales Prisma ein sehr lichtstarkes, horizontales Spectrum des elektrischen Bogenlichtes auf einem Schirm entworfen hatte und dann in den Weg der Lichtstrahlen einen Bunsen'schen Brenner stellte, in dem in einem Eisenlöffelchen ein Stück metallisches Natrium brannte, sah er das Spectrum in der beistehenden, merkwürdigen Gestalt. Er erklärte sehr glücklich die auffallenden Ausbuchtungen, welche das Spectrum an der dunklen $D$-Linie zeigt, sogleich für eine Erscheinung der anomalen Dispersion des Natrondampfes, der bei der conischen Form der Flamme wie ein Prisma wirkt. Dieses Prisma, dessen brechende Kante wagerecht oben liegt, erzeugt für sich ein Spectrum, dessen am meisten abgelenkter Theil nach unten gerichtet ist. Die Ausbuchtungen sind die Theile des durch dieses Prisma erzeugten Spectrums; ihre Form zeigt, dass auch hier, entsprechend dem Kundt'schen Gesetze, der Theil vor dem Absorptions-




streifen stärker abgelenkt wird, als der Theil nach dem Streifen. Aus dem constatirten Zusammenhange der auswählenden Absorption und der Reflexion zieht Kundt für Gase hier noch den Schluss, dass Gase, welche eine Farbe stark absorbiren, dieselbe auch stark reflectiren müssen, und dass danach auch Gase, welche nicht selbstleuchtend sind, durch reflectirtes Licht in einer ihnen eigenthümlichen Reflexionsfarbe erscheinen können.

Was nun die Verbindung der anomalen Dispersion und vor Allem des Kundt'schen Gesetzes mit der Theorie des Lichtes betrifft, so übte der unleugbare Zusammenhang, der zwischen Absorption und Grösse der Brechung constatirt wurde, einen starken Einfluss auf die Dispersionstheorie überhaupt aus. Früher hatte man alle Veränderungen, welche das Licht durch das Zusammentreffen mit der ponderablen Materie erleidet, indirect durch besondere Dichtigkeitszustände des in den Körpern enthaltenen Aethers erklärt. Jetzt zeigte der Zusammenhang der Brechung und Reflexion mit der Absorption, welch letztere doch nur durch eine Umwandlung der Aetherbewegungen in solche der ponderablen Materie erklärt werden konnte,

[1]) Ueber anomale Dispersion im glühenden Natriumdampf, Wiedem. Ann. X, S. 321, 1880.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

dass man wohl auch die anderen Modificationen des Lichtes in den Körpern durch eine theilweise Uebertragung der Lichtbewegung auf die Körpermolecüle erklären müsse. Wie schon angedeutet, hatte Boussinesq[1]) in der Mitte der sechziger Jahre diesen Weg mit Erfolg beschritten. Er betrachtete den Aether überall wie im leeren Raume als gleichartig, von derselben Elasticität und derselben Dichtigkeit. Die Aetherwellen, welche zwischen den Molecülen der Körper sich fortpflanzen, ändern sich nicht durch besondere Beschaffenheiten des Aethers in den Körpern, sondern nur dadurch, dass sie ihre Bewegungen theilweise an die Molecüle der Körper abgeben und von diesen wieder rückwärts beeinflusst werden. Daraus ging die Grundbedingung der Undulationstheorie hervor, dass das Licht in den Körpern sich langsamer fortpflanzen müsse als im leeren Raume, und daraus leitete Boussinesq einfacher und strenger als vorher die Fresnel'schen Gesetze der Doppelbrechung, eine der Cauchy'schen analoge Dispersionsformel, sowie die **Erscheinungen der Rotationspolarisation** ab[2]). Auf solchen Anschauungen bauten sich dann auch die theoretischen Begründungen des Zusammenhanges zwischen der Absorption und der Brechung des Lichtes in den Körpern und damit die Theorie der anomalen Dispersion auf. W. Sellmeyer[3]) veröffentlichte schon in demselben Bande von Poggendorff's Annalen, in welchem die zweiten Abhandlungen Christiansen's und Kundt's erschienen, eine **neue Dispersionstheorie**, welche auch die Erklärung der **anomalen** Dispersion enthielt. Indem er die Verschiedenheit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in den Körpern auf eine theilweise Mittheilung der Aetherbewegung an die ponderablen Molecüle zurückführte, gelang es ihm nachzuweisen, dass die Körpertheilchen, welche Licht von einer bestimmten Schwingungsdauer absorbiren können, auch die Brechungsexponenten der Lichtstrahlen von anderer Schwingungsdauer und zwar so zu ändern vermögen, dass der Exponent bei Licht von grösserer Schwingungsdauer als das absorbirte vergrössert, und bei Licht von kleinerer Schwingungsdauer verkleinert wird. O. E. Meyer[4]) nahm zur Erklärung der anomalen Dispersion nur an, dass die Schwingungen der Aethertheilchen beim Durchgang durch einen ponderablen Körper einen Widerstand erfahren, liess aber unbestimmt, woher dieser Widerstand stammt. C. Puschl setzte voraus[5]), dass sich das Licht in den Körpern nicht bloss durch den Aether, sondern auch durch die Atome der Körper selbst fortpflanze und nur in diesen

---

[1]) Siehe S. 311 d. Bandes.

[2]) Siehe auch Verdet-Exner, Undulationstheorie des Lichtes, II, S. 29.

[3]) Pogg. Ann. CXLIII, S. 272, 1871. Weiter in Pogg. Ann. CXLV, S. 399 und 520; CXLVII, S. 386 und 525.

[4]) Pogg. Ann. CXLV, S. 80, 1872.

[5]) Wiener Sitzungsber. LXVIII, S. 446, 1873.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

verzögert werde. Wenn dann die Atome eine besondere Lichtgattung besonders langsam fortpflanzen, so werden sie dieselbe nicht bloss besonders stark brechen und reflectiren, sondern auch besonders stark absorbiren; denn durch die zahllosen inneren Reflexionen wird dieses Licht schnell ausgelöscht werden. Es hängen also die starke Absorption, die starke Reflexion und eine starke (anomale) Brechung durch die langsame Fortpflanzung des Lichtes in den Atomen natürlich in sich zusammen. Genauer auf die Widerstände, welche die Bewegungen des Aethers beim Eindringen in die ponderablen Körper erleiden, ging Helmholtz in einer Abhandlung „Zur Theorie der anomalen Dispersion" vom Jahre 1874 [1]) ein. Er drückte darin die Bewegungen des Aethers, wie die der ponderablen Molecüle durch zwei Formeln aus. Die erste gab in einer Differentialgleichung die Kraft des freien Aethers, ausgedrückt durch die Summe aus den Bewegungen, die dem Aether in den Körpern noch bleiben, und aus denjenigen, die er auf die ponderable Masse überträgt. Die andere Differentialgleichung stellte die in den Schwingungen der ponderablen Atome wirksame Kraft dar als die von dem Aether ihnen übertragene Kraft, vermindert um die Widerstandskraft, welche die übrigen relativ feststehenden Theile der ponderablen Massen, wenn solche da sind, auf den bewegten Theil ausüben [2]), und weiter noch vermindert um den Theil der Kraft, welche durch einen der Reibung ähnlichen Vorgang in Wärme übergeführt und also absorbirt wird. Durch Integration dieser Differentialgleichungen kam dann Helmholtz zu Formeln für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes und damit auch für das Verhältniss der Wellenlängen zu den Brechungsexponenten, die wirklich von den Absorptionscoëfficienten abhängig waren. Aus ihnen folgten auch, je nachdem man den Absorptions-

---

[1]) Pogg. Ann. CLIV, S. 582, 1875; auch schon Monatsber. der Berliner Akademie, October 1874, abgedruckt in Wissenschaftliche Abhandlungen II, S. 213. Helmholtz sagt über die Theorie Sellmaier's, dass sie wohl geeignet sei, über die wesentlichsten Züge der Erscheinungen der anomalen Dispersion Rechenschaft zu geben, dass sie aber für den Fall der Absorption des Lichtes keine Kraft einführe, welche die mechanische Arbeit der schwingenden Bewegung vernichten, beziehentlich in Wärme verwandeln könnte, und dass sie sich für diesen Fall mit Betrachtungen behelfe, die vorläufig noch keiner analytischen Fassung fähig seien. Er habe deshalb versucht, die von Sellmaier gegebene Erklärung in der Weise umzubilden, dass er eine Reibungskraft, welche der Bewegung der ponderablen Molecüle entgegenwirkt, in derselben Form eingeführt, wie sie bei den langsameren Schwingungen des Pendels und der tönenden Körper sich wohl bewährt und eine mit den Versuchen gut zusammenstimmende Theorie des Mitschwingens ergeben habe.

[2]) Dazu macht Helmholtz die Bemerkung (Pogg. Ann. CLIV, S. 585): „Wiederum mag hier zur Vereinfachung der Rechnung die der Wirklichkeit wohl nicht ganz entsprechende, mechanisch aber unanstössige Annahme gemacht werden, dass schwere centrale Massen der Molecüle festliegen und die beweglichen Theile derselben gegen diese und den Aether eine bestimmte Gleichgewichtslage zu bewahren streben."

coëfficienten gleich Null setzte oder ihm einen grösseren Werth beilegte, die Gesetze der normalen und der anomalen Dispersion. Dieselben Annahmen wie Helmholtz über die Wechselwirkung zwischen den Bewegungen des Aethers und der ponderablen Materie benutzte auch Ketteler[1]) bei Begründung seiner Dispersionstheorie, nur dass er die Hemmungs- und Widerstandskräfte, welche dabei die ponderablen Molecüle ausüben, noch weiter zu verfolgen sich bemühte.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

Die Spectralanalyse hat bis in die letzte Zeit einen grossen Theil des Interesses der Experimentalphysiker absorbirt, neben ihr erhielten sich nur wenige Zweige der Optik in einem verhältnissmässigen Fortschritte. Ein solcher Zweig war jedenfalls die Photometrie, die nicht bloss bei der Untersuchung der Gestirne der Spectralanalyse eine Gehülfin war, sondern auch von der immer mehr sich entwickelnden Beleuchtungstechnik stark in Anspruch genommen wurde. Da das Auge als messendes Instrument für die Intensität des Lichtes bekanntermaassen von subjectiven Bedingungen stark beeinflusst wird und auch nur relative Messungen erlaubt, so zielten die Bemühungen neben den Verbesserungen der gebräuchlichen Photometer vor Allem darauf hin, Instrumente zu construiren, die von der Schätzung der Lichtstärke unabhängiger sind und welche die Angaben der Lichtintensitäten in absoluten Einheiten ermöglichen. Die stärkste Anregung ging in dieser Beziehung von Zöllner aus, der im Jahre 1857 mit photometrischen Arbeiten seine wissenschaftliche Laufbahn begann. Beeinflusst erscheint er dabei vor Allem von Seidel und Wild. Seidel hatte im Jahre 1846[2]) ein Steinheil'sches Photometer[3]), d. i. ein Fernrohr mit zerschnittenem Objectiv, das die Bilder der zu vergleichenden Sterne direct neben einander bringt, benutzt, um die Helligkeit verschiedener Planeten und Fixsterne erster Grösse mit der des hellsten Sternes Vega in der Leyer zu vergleichen. Seine Messungen stimmten mit denen Herschel's gut überein[4]). H. Wild aber hatte kurz vor Zöllner im Jahre 1856[5]) noch eine ganz neue Art von Photometern

[1]) Pogg. Ann., Jubelbd., S. 166, 1874; Verhandl. d. naturh. Vereins f. Rheinland-Westphalen, 33. Jahrg., S. 197; Pogg. Ann. CLX, S. 466, 1877; ibid. Ergänzungsbd. VIII, S. 444, 1878; Wiedem. Ann. 1879, 1880 u. s. w. — E. Ketteler, geb. am 18. April 1836, Prof. der Physik in Bonn.

[2]) Münchener gelehrte Anzeigen XXIII, S. 1. 1846; Abhandl. der Münchener Akad. VI, 3. Abth., 1852. — Ph. L. v. Seidel, geb. 24. Oct. 1821, Prof. der Math. a. d. Univers. München.

[3]) Pogg. Ann. XXXIV, S. 644, 1835.

[4]) Er erhielt z. B. Sirius 5,13; Arctur 0,84; Capella 0,83; Aldebaran 0,36; Deneb 0,35; Mars (24. August 1845) 6,80; Jupiter (1. September 1845) 8,50.

[5]) Pogg. Ann. XCIX, S. 235. Die vollständige Theorie in Pogg. Ann. CXVIII, S. 193. Wild sagt über die Principien seines Apparates: „Neumann in Königsberg hat in seiner Vorlesung über Optik die Theorie eines Apparates berührt, mittelst dessen man an theilweise polarisirtem Licht das Verhältniss der Intensitäten des natürlichen und polarisirten Lichtes bestimmen kann. Verschafft man sich nun von den beiden zu untersuchenden Lichtstrahlen zwei

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

beschrieben, bei welchen er zur Schwächung des Normallichtes bis zur Gleichheit mit dem zu messenden Lichte nicht wie früher eine Entfernung des ersteren vom Photometer, sondern vielmehr eine Polarisation desselben anwandte. Zöllner's [1]) Polarisationsphotometer oder Astrometer, wie er es seiner vornehmsten Anwendung wegen auch nannte, besteht in letzter Einrichtung aus einem Fernrohre, in dessen unterem Ende, an dem Orte, wo das Bild vom Objectiv erzeugt wird, eine planparallele, unbelegte Glasplatte unter einem Winkel von 45° gegen die Achse des Fernrohres aufgestellt ist. Seitwärts von dieser Platte ist das Fernrohr an ein anderes Rohr angesetzt, so dass seine Achse mit dem Fernrohr einen Winkel von 90°, mit der Glastafel einen Winkel von 45° bildet. Das äusserste Ende dieses Seitenrohres trägt eine kleine Oeffnung, durch welche das Licht einer Petroleumlampe von constanter Helligkeit einfällt, das von einer folgenden Sammellinse direct neben dem Bilde des Fernrohr-Objectivs zu einem Bilde vereinigt wird. Um nun das Bild des so erzeugten künstlichen Sternes auf dieselbe Intensität mit dem vom Objectiv erzeugten Bilde des natürlichen Sternes zu bringen, befinden sich in dem seitlichen Rohre zwei Nicol'sche Prismen. Das nach dem Fernrohr hin gelegene ist fest, das nach der Lampe hin gelegene ist drehbar und mit einem Theilkreise zum Messen der Drehung versehen. Der Grad der Schwächung, welche das Licht der Lampe durch die Drehung des Nicols erleidet, wird nach dem Malus'schen Cosinusgesetze berechnet. Dieses Photometer war nur zur Messung der Intensität von Lichtpunkten zu gebrauchen, zur Vergleichung leuchtender Flächen diente ein ähnliches Photometer, bei dem das Gesichtsfeld zur Hälfte von der zu untersuchenden Lichtquelle, zur Hälfte von Normallicht beleuchtet wurde. Um endlich auch Lichter verschiedener Farbe mit einander vergleichen zu können, brachte Zöllner im seitlichen Rohre vor dem drehbaren Nicol eine Quarzplatte und vor diesem noch ein drittes Nicol'sches Prisma an, durch dessen Drehung er dem Normallichte auch

---

zusammenfallende Strahlen, die senkrecht zu einander polarisirt sind, so wird der resultirende Strahl den Eindruck von theilweise polarisirtem Lichte machen, wenn die beiden senkrecht zu einander polarisirten Antheile nicht gleich stark sind, wogegen er als natürliches Licht erscheint, wenn die Antheile gleich sind. Besitzt man dann Mittel, die componirenden polarisirten Antheile beliebig zu ändern und alsdann den Punkt genau zu erkennen, wo beide gleich sind, also zu natürlichem Lichte sich neutralisiren, so werden wir sofort im Stande sein, das Verhältniss der Intensitäten der beiden Lichtquellen anzugeben, falls wir für den Neutralisationspunkt bestimmen können, wie viel in jedem Strahle von dem natürlichen Lichte der betreffenden Lichtquelle polarisirt worden ist."

[1]) Zöllner's photometrische Arbeiten sind die folgenden: Photometrische Untersuchungen, Pogg. Ann. C, S. 381, 474 und 651, 1859; ibid. CIX, S. 244, 1860; Grundzüge einer allgemeinen Photometrie des Himmels, Berlin 1861; Photometrische Untersuchungen mit besonderer Rücksicht auf die physikalische Beschaffenheit der Himmelskörper, Leipzig 1865; Resultate aus der letzten Arbeit enthalten auch Pogg. Ann. CXXVIII, S. 260, 1866.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

jede beliebige Farbe geben konnte. Doch zeigte sich immer die Vergleichung verschiedenfarbiger Lichter unsicher; für das Helligkeitsverhältniss gleichfarbiger Lichter dagegen erhielt Zöllner durchschnittlich ähnliche Werthe, wie sie Seidel mit dem Steinheil'schen Prismenphotometer gefunden hatte. Auch R. Engelmann, der zur Beobachtung der grossen Sonnenfinsterniss von 1868 sich in Vorderindien aufhielt und dort die Helligkeit verschiedener heller Sterne mit dem Astrophotometer maass, bekam Resultate, die mit den Herschel'schen von 1834 bis 1838 gut übereinstimmten.

Die Zöllner'schen Resultate für die relativen Lichtstärken der Planeten sind unter Anderem:

| | | | Proc. |
|---|---|---|---|
| $\frac{\text{Sonne}}{\text{Vollmond}}$ | 618000 (oder 619000) | mit einem wahrsch. Fehler von | 1,6 (2,7) |
| $\frac{\text{Sonne}}{\text{Mars}}$ | 6994 Millionen | „ „ „ „ „ | 5,8 |
| $\frac{\text{Sonne}}{\text{Jupiter}}$ | 5472 „ | „ „ „ „ „ | 5,7 |
| $\frac{\text{Sonne}}{\text{Saturn}}$ | 130980 „ | „ „ „ „ „ | 5,0 |
| $\frac{\text{Sonne}}{\text{Uranus}}$ | 8,486 Billionen | „ „ „ „ „ | 6,0 |
| $\frac{\text{Sonne}}{\text{Neptun}}$ | 79,620 „ | „ „ „ „ „ | 5,5 |

Daraus berechnete er für die Albedo $\mu$ dieser Planeten (d. i. für die Verhältnisse des auftreffenden zum reflectirten Lichte) die Werthe:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Mond . . | $\mu = 0,1736$ | Saturn . | $\mu = 0,4981$ |
| Mars . . | $\mu = 0,2672$ | Uranus . | $\mu = 0,6400$ |
| Jupiter . | $\mu = 0,6236$ | Neptun . | $\mu = 0,4648$ |

Zur Vergleichung gab er für irdische Körper die Zahlen:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Frisch gefallener Schnee | $\mu = 0,783$ | Dunkelgrauer Syenit | $\mu = 0,078$ |
| Weisses Papier . . . | $\mu = 0,700$ | Quecksilber . . . | $\mu = 0,648$ |
| Weisser Sandstein . . | $\mu = 0,237$ | Spiegelmetall . . . | $\mu = 0,535$ |
| Thonmergel . . . . | $\mu = 0,156$ | Glas . . . . . . . | $\mu = 0,040$ |
| Quarz-Porphyr . . . | $\mu = 0,108$ | Obsidian . . . . | $\mu = 0,032$ |
| Feuchte Ackererde . . | $\mu = 0,079$ | Wasser . . . . . . | $\mu = 0,021$ [1] |

Einen bedeutenden Fortschritt in der Vergleichung der Intensität verschiedenfarbiger Lichter machte K. Vierordt[2], indem er

[1]) Pogg. Ann. CXXVIII, S. 263 bis 266.

[2]) Die Anwendung des Spectralapparates zur Messung und Vergleichung der Stärke des farbigen Lichtes, Tübingen 1871. Die Anwendung des Spectralapparates zur Photometrie der Absorptionsspectra und zur quantitativen chemischen Ana-

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

den Spectralapparat mit dem Photometer verband und von dem Normallichte ein Spectrum entwarf, dessen entsprechenden Theil er mit dem zu messenden farbigen Lichte verglich. Vierordt bezweckte vor Allem auch, die absorbirende Kraft verschiedener durchsichtiger Substanzen für die verschiedenen Theile des Spectrums zu messen. Zu dem Zwecke verdeckte er an einem grösseren Spectralapparate die eine Hälfte des Eintrittsspaltes durch das zu untersuchende durchsichtige Medium, so dass er zwei Spectren, das Absorptions- und das Vergleichsspectrum, über einander erhielt. Zur Abblendung des Spectrums bis auf den bestimmten zu beobachtenden Theil waren im Fernrohre des Spectralapparates vor dem Ocular an Stelle des Fadenkreuzes zwei bewegliche, undurchsichtige Schieber angebracht, und damit man die Intensität des Vergleichsspectrums bis auf die des Absorptionsspectrums schwächen konnte, so waren die Schieber der Eintrittspalte aus zwei oberen und unteren Theilen zusammengesetzt, die eine unabhängige Verengerung oder Erweiterung der oberen oder unteren Hälfte dieser Spalte erlaubten; doch konnte die Schwächung des Vergleichsspectrums auch durch Rauchgläser von bekannter lichtschwächender Kraft bewirkt werden. Dass auf ähnliche Weise auch die verschiedenen Theile der Spectren directen Lichtes verglichen werden können, ist einleuchtend. Vierordt fand für die einzelnen Theile des Sonnenspectrums, wenn er die Gesammtintensität desselben gleich 1000000 setzte, die folgenden Werthe:

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| von Linie | *A* | bis | *a* | 72 | | von Linie | *D* | bis | *E* | 478544 |
| „ | „ | *a* | „ | *B* | 1592 | „ | „ *E* | „ | *F* | 186143 |
| „ | „ | *B* | „ | *C* | 4114 | „ | „ *F* | „ | *G* | 36190 |
| „ | „ | *C* | „ | *D* | 288957 | „ | „ *G* | „ | *H* | 4383 |

Für die Genauigkeit der Messungen mit diesem Apparate erscheint indessen die Methode der Lichtschwächung durch Verengerung oder Verbreiterung der Lichtspalte verhängnissvoll, weil damit immer auch die Farbenmischung des betreffenden einfallenden Lichtes verändert wird. Glan [1]) hat darum in einem nach dem Vierordt'schen Principe construirten Apparate wieder auf die Schwächung des Lichtes durch die Polarisation zurückgegriffen, und H. C. Vogel [2]) hat danach ein solches Spectralphotometer bei seinen Beobachtungen der Absorption der die Sonne umgebenden Glashülle mit gutem Erfolge benutzt.

Bei allen diesen Photometern ist immer noch die subjective Empfindung der Helligkeit das einzig messende Moment, die absolute Photometrie, bei welcher die Lichtintensität direct mit anderen phy-

---

lyse, Tübingen 1873. Referat in dem Jahrbuche der Erfindungen IX, S. 70. — K. v. Vierordt, 1. Juli 1818 Lahr — 22. November 1884 Tübingen, Prof. d. Physiologie in Tübingen.

[1]) Wiedem. Ann. II, S. 351, 1877. — P. Glan, geb. am 26. Februar 1846, Privatdocent in Berlin.

[2]) Monatsber. d. Berl. Akad. 1877, S. 104.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtather und den ponderablen Moleculen, c. 1859 bis c. 1880.

sikalischen Kräften verbunden und durch sie gemessen wird, hat es bis jetzt kaum zu mehr als Vorschlägen gebracht. W. Siemens[1]) verfertigte 1875 ein Photometer, bei welchem wenigstens die directe subjective Schätzung durch das Auge keine Rolle mehr spielte und das auch wohl zu einer Angabe von Lichtstärken in elektrischem und danach in absolutem Maasse dienen könnte, indem er die Veränderung der elektrischen Leitungsfähigkeit des krystallinischen Selens durch die Beleuchtung zur Messung benutzte. Ein Selenstück wurde nämlich mit einem Daniell'schen Elemente und einem Galvanometer zusammen in einen Stromkreis eingeschaltet und eine Normalkerze dann so lange verschoben, bis sie durch die Beleuchtung des Selens denselben Galvanometerausschlag erzeugte, wie das seiner Intensität nach zu messende Licht. Zöllner[2]) aber, der schon in seinen früheren Arbeiten die Intensität des Lichtes gleich der lebendigen Kraft desselben gesetzt hatte, versuchte nun die erstere durch die letztere zu messen, indem er den Einfluss des Lichtes auf das Radiometer an einer mit dem Radiometerkreuze verbundenen kreisförmigen Scala messen wollte und die Drehung des Kreuzes (wenigstens wenn dieselbe keine volle Umdrehung betrug) der lebendigen Kraft der Lichtstrahlen proportional setzte.

Eine unerwartete Grenze wurde in dieser Zeit der Verbesserung der Mikroskope gesetzt. Wie das Fernrohr uns immer weitere Räume in unermesslichen Grössen erschliesst, so glaubte man vom Mikroskope erwarten zu dürfen, dass es uns auch in die Welt des unermesslich Kleinen immer weiter einführen werde. Nun aber wurde durch Prof. Abbe und gleichzeitig auch durch Helmholtz gezeigt, dass wir schon an der Grenze des Erkennbaren nach der Richtung des Kleinen fast völlig angelangt sind und dass das Mikroskop seine weitere Führerschaft auf diesem jedenfalls unendlichen Wege bald wird aufgeben müssen. Erst in diesem Jahrhundert hatten die zusammengesetzten Mikroskope sich so vervollkommnet, dass sie mit den einfachen auch an Klarheit und Deutlichkeit der Bilder concurriren konnten, und erst danach hatte man starke Vergrösserungen mit sicherem Vortheil verwenden können. Um das Jahr 1860 construirten dann die berühmten Optiker Hartnack und Merz u. Söhne, einem Gedanken von Amici folgend, ihre sogenannten Immersionssysteme, bei denen zwischen das Deckgläschen und das Objectiv statt der Luft eine Flüssigkeit, wie Wasser, Glycerin oder Mohnöl, gebracht wurde und die danach plötzlich wieder eine starke Steigerung

---

[1]) Revue d. Fortschr. d. Naturw. III, S. 438, 1875.

[2]) Das Scalen-Photometer, ein neues Instrument zur mechanischen Messung des Lichtes, nebst Beiträgen zur Geschichte und Theorie der mechanischen Photometrie. Leipzig 1879. Auch Crookes selbst hatte schon sein Radiometer als Photometer empfohlen (Nature XIII, p. 392 und 452, 1876).

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

der Vergrösserung erlaubten [1]). Die Erwartung, dass nun in gleichem Tempo vielleicht diese Steigerung der Vergrösserung fortgesetzt werden könnte, wurde aber, wie schon bemerkt, im Jahre 1874 durch eine Abhandlung von E. Abbe „Ueber die Grenzen der Leistungsfähigkeit der Mikroskope" [2]) vernichtet. Abbe betonte, dass die mögliche Stärke der mikroskopischen Vergrösserung vor Allem abhänge von der Beugung der Lichtstrahlen. Nach ihm können keine Structurverhältnisse mehr wahrgenommen werden, deren einzelne Theile einander so nahe stehen, dass nicht wenigstens das erste durch Beugung erzeugte Lichtbüschel gleichzeitig mit dem ungebeugten Lichtkegel in das Objectiv eintreten kann. Daraus folgt, dass für centrale Beleuchtung die Entfernung der getrennt zu sehenden Theile niemals unter die Grösse der ganzen und für äusserste schiefe Beleuchtung nicht unter die Grösse der halben Wellenlänge des angewandten Lichtes herabsinken kann. Wie oben angedeutet, kam um dieselbe Zeit Helmholtz [3]) zu ganz entsprechenden Ergebnissen, fügte aber sogleich seiner Arbeit auch die theoretischen Ableitungen der Resultate bei, was Abbe in seiner Mittheilung noch unterlassen hatte. Als Maass für die kleinsten unterscheidbaren Objecte nahm Helmholtz diejenigen Abstände heller Gitterstäbe [4]) an, bei welchen die letzteren noch als getrennt wahrgenommen werden. Da sich nun ableiten lässt, dass das Gitter als eine gleichförmig beleuchtete, gleichmässig helle Fläche erscheint, wenn die Breite der Beugungsfransen gleich der Breite eines Gitterintervalls ist, so erhält man für die kleinste Distanz $\varepsilon$, welche durch ein Mikroskop noch unterschieden werden kann, die Formel $\varepsilon = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}$, wo $\lambda$ die Wellenlänge im Medium des Objectes und $\alpha$ der Divergenzwinkel der

[1]) Harting sagt über die ersten Immersionssysteme (Pogg. Ann. CXIV, S. 82, 1861): „Hartnack hatte bei diesem Systeme das im Jahre 1850 von Amici gegebene Beispiel befolgt und demselben ausdrücklich die Bestimmung ertheilt, dass zwischen dem Deckgläschen und der freien Fläche der untersten Linse eine dünne Wasserschicht sich befindet . . . Da das Wasser ein stärker lichtbrechendes Medium ist als die Luft, so nimmt die Reflexion der Lichtstrahlen an der Oberfläche des Objectivs bedeutend ab, ja sie kommt gänzlich in Wegfall. Folglich dringen auch mehr Lichtstrahlen in das Mikroskop und die dünne Wasserschicht hat die nämliche Wirkung, wie die Vergrösserung des Oeffnungswinkels. Diese günstige Wirkung wird dann hauptsächlich den Randstrahlen zu Theil, die am schiefsten einfallen . . ., so muss das Unterscheidungsvermögen des Mikroskops durch jene Zwischenschicht sich steigern."

[2]) Schultze's Arch. f. mikroskop. Anatomie IX, S. 413, 1874. — E. Abbe, geb. am 23. Januar 1840, Prof. in Jena.

[3]) Pogg. Ann., Jubelband, S. 557, 1874; auch Wissenschaftliche Abhandl. II, S. 185.

[4]) Solche Glasgitter zur Untersuchung der Vergrösserung der Mikroskope hat zuerst der Optiker F. A. Nobert in Greifswald 1846 empfohlen und verfertigt. Er zog auf Glas Liniengruppen, in denen die einzelnen Linien Abstände von 0,001 000, 0,000 857, 0,000 735, 0,000 630, 0,000 540, 0,000 463, 0,000 397, 0,000 340, 0,000 292, 0,000 225 Par. Linien (Pogg. Ann. LXVII, S. 173) hatten.

einfallenden Strahlen ist. Für den Divergenzwinkel $90^0$ ergiebt sich danach, wie bei Abbe, $\varepsilon = \frac{\lambda}{2}$, oder in bestimmten Zahlen bei alleiniger Berücksichtigung der mittleren, hellsten Strahlen des weissen Lichtes für ein gewöhnliches Objectiv $\varepsilon = \frac{1}{3636}$ mm und für ein Immersionssystem, in dem Wasser zwischen dem Deckglas und dem Objectiv sich befindet, $\varepsilon = \frac{1}{4848}$, welch letzterer Werth jedoch des kleineren möglichen Divergenzwinkels wegen hier nicht ganz erreicht werden kann. Messungen an den besten vorhandenen neueren Mikroskopen zeigen nun, dass diese stärkste mögliche Vergrösserung und damit die Grenze der Leistungsfähigkeit der Mikroskope in der That schon nahezu erreicht ist. Helmholtz bemerkt dabei nur, dass die Anwendung von homogenem blauem Licht durch die kleinere Wellenlänge desselben auch jedenfalls noch eine stärkere Vergrösserung als hier für weisses Licht angegeben ermögliche. Abbe aber betonte, dass man auch die noch bedeutend kürzere Wellenlänge der chemisch-wirksamen ultravioletten Strahlen benutzen könne, wenn man die photographische Aufnahme mikroskopischer Bilder benutzen wollte, und dass man damit die Grenzen unseres Unterscheidungsvermögens für das unsichtbar Kleine noch bedeutend hinausrücken könnte.

Spectralanalyse, Wechselwirkungen zwischen dem Lichtäther und den ponderablen Molecülen, c. 1859 bis c. 1880.

In der That wurde durch diese Ideen das allgemeine Interesse mächtig geweckt, und von dieser Zeit datirt der schnelle, bewundernswerthe Aufschwung der sich bis dahin nur sehr langsam entwickelnden mikroskopischen Photographie. Da nun auch in der letzten Zeit die Photographie der Sonne, des Mondes, der Planeten und des Sternenhimmels immer besser gelang und erfolgreicher betrieben wurde, da man mit Huggins die Spectren der irdischen Flammen wie der Himmelskörper photographiren und dadurch fixiren lernte, da man immer mehr sich gewöhnte, vermittelst physikalischer Registrirapparate alle möglichen Vorgänge direct durch die Photographie protokolliren zu lassen, so wurde dadurch die letztere immer mehr aus dem Reiche der Künste auch in das Reich der Wissenschaft übergeführt, wo man sie mit frohen Hoffnungen aufnahm. Es ist auch durchaus wahrscheinlich, dass die Eroberungen dieser Kunst in der Wissenschaft in Zukunft ganz allgemeine sein werden und dass sie immer mehr das werden wird, wozu sie sich jetzt schon in vielen Fällen als fähig gezeigt, nämlich der allgemeine, unbestechliche Protokollführer der Naturwissenschaften, der unparteiische, unanfechtbare, anerkannt sichere Zeuge für jede in der Einsamkeit gemachte wissenschaftliche Untersuchung.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Einen starken Aufschwung nahm mit dem Anfang der sechziger Jahre unseres Jahrhunderts auch das Interesse für **akustische Probleme**,

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

angeregt vor Allem durch Helmholtz' epochemachendes Werk: „Die Lehre von den Tonempfindungen“, das von 1863 bis 1877 in vier Auflagen erschien [1]). Zwar wurde diese Arbeit, wie schon der Titel anzeigt, nicht direct durch physikalisches, sondern eher durch physiologisches und musikalisches Interesse veranlasst, doch aber hat sie durch die klare, weittragende Art ihrer Behandlung das ganze Gebiet der Akustik befruchtet und schliesslich sogar auch die rein mechanischen Theile dieser Disciplin gefördert.

Helmholtz scheidet alle Tonempfindungen in Geräusche und Klänge. Die letztere Empfindung wird hervorgebracht durch schnelle, periodische Bewegungen tönender Körper, die durch Wellenbewegungen der Luft in unser Gehör geleitet werden, die erstere entsteht durch nicht periodische Bewegungen. Ein Klang ist durch drei Momente charakterisirt: durch die Stärke, die Tonhöhe und die Klangfarbe. Da die Stärke von der Schwingungsweite, die Tonhöhe von der Schwingungsdauer abhängt, so bleibt in Betreff der Klangfarbe nur übrig, zu vermuthen, dass sie durch die Form der Schwingungen bedingt wird. Verschiedene Schwingungsformen können sich (bei gleicher Schwingungsweite und gleicher Schwingungsdauer) nur durch die Art der Bewegung innerhalb der Schwingungsperioden, durch das verschiedene Anwachsen und Abnehmen der Geschwindigkeit während einer Schwingungsdauer unterscheiden. Die einfachsten Schwingungsformen sind diejenigen, bei welchen die Veränderungen der Geschwindigkeiten der schwingenden Theilchen gerade so erfolgen, wie bei den Schwingungen eines Pendels; wir nennen sie darum Pendelschwingungen, oder, weil die Entfernung $y$ des schwingenden Theilchens von der Gleichgewichtslage zu einer bestimmten Zeit durch die Formel $y = A \sin \frac{2\pi}{T} t$ [2]) dargestellt wird, auch Sinusschwingungen. Alle anderen Schwingungen, bei denen entweder die Geschwindigkeiten in anderer Weise als beim Pendel bis zu einem Maximum steigen, oder bei denen innerhalb der Periode neben dem absoluten Maximum noch ein oder mehrere relative Maxima der Geschwindigkeit vorhanden sind, kann man sich so entstanden denken, als seien den bewegten Theilchen mehrere einfache Schwingungen mitgetheilt worden, deren Schwingungszahlen ein-, zwei-, drei- etc. mal so gross als die der zusammengesetzten Schwingung sind. Das hat Fourier

[1]) In einzelnen wissenschaftlichen Abhandlungen behandelte Helmholtz das Thema seines Werkes schon seit 1856. Ein populärer Vortrag, den er im Winter 1857 in Bonn (der Vaterstadt Beethoven's) „Ueber die physiologischen Ursachen der musikalischen Harmonie“ hielt, enthält schon die fundamentalen Ideen desselben (abgedruckt in „Vorträge und Reden“, Braunschweig 1884, S. 79).

[2]) Wie bekannt, ist hier $A$ gleich der Amplitude und $T$ gleich der Dauer der (ganzen) Schwingungen, $t$ bezeichnet die Zeit, vom Ausgange aus der Gleichgewichtslage nach der positiven Seite hin gezählt.

in seiner Théorie analytique de la châleur bewiesen, indem er gezeigt hat, dass jede regelmässig periodische Bewegung eines Punktes durch die Gleichung

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

$$y = A_1 \sin\frac{2\pi}{T}(t-t_1) + A_2 \sin\frac{4\pi}{T}(t-t_2) + A_3 \sin\frac{6\pi}{T}(t-t_3) + \cdots$$

dargestellt werden kann. Dort ist auch weiter abgeleitet, dass für jede gegebene periodische Bewegung eine solche Zerlegung in einfache Theilschwingungen nur auf eine einzige Weise möglich ist und dass sonach mit der zusammengesetzten Bewegung auch die einzelnen Theilbewegungen eindeutig gegeben sind. Was Fourier rein mechanisch dargestellt, das interpretirte G. S. Ohm akustisch [1]). Nach ihm wird nur der Klang von dem Ohre als einfacher Ton empfunden, der durch eine einfache Sinusschwingung erzeugt wird; alle anderen Klänge werden in Töne zerlegt, welche den einzelnen Gliedern der Fourier'schen Reihe entsprechen und die man in jedem Falle als Grundtöne und Obertöne auch mit dem Gehör unterscheiden kann. Damals bestritt Aug. Seebeck [2]) diese Erklärung mit vielem Eifer, indem er darauf aufmerksam machte, dass allen durch die Fourier'sche Reihe bestimmten Theilschwingungen, wenn sie gleich verschieden grosse, eigene Schwingungsperioden hätten, doch auch die Schwingungsperiode $T$ gemeinsam sei. Er behauptete danach, dass das Ohr immer nur den der Periode $T$ entsprechenden Grundton wirklich wahrnehmen werde, und bemerkte, dass er auch an der Sirene z. B. die Ohm'schen Obertöne nie oder nur so schwach gehört habe, dass damit der Theorie jedenfalls nicht genügt werde. Nur das gab er zu, dass durch die Zahl der Glieder und die Werthe der Constanten der Fourier'schen Reihe, welche einem gewissen Tone entspricht, vielleicht die Art des Tones, vor Allem die Klangfarbe bestimmt werden könnte. Helmholtz zeigte nun, dass die Erklärung Ohm's von der Zusammensetzung der Klänge sicher richtig, dass aber damit die letzte Vermuthung Seebeck's auch wohl zu vereinigen sei, dass nämlich in jedem Klange neben dem Grundtone einzelne der Fourier'schen Reihe entsprechende Obertöne enthalten sind, die aber vom Ohre ohne besondere Uebung und Aufmerksamkeit nicht besonders wahrgenommen werden und nur dazu dienen, dem Grundtone die besondere Klangfarbe zu

[1]) Definition des Tones nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene, Pogg. Ann. LIX, S. 497, 1843; LXII, S. 1, 1844. Mit Ohm stimmte Duhamel überein, der 1848 zu dem Resultate kam: „Si l'on décompose le mouvement vibratoire d'un point en plusieurs autres, l'oreille se trouve affectée sensiblement de la même manière par le mouvement de ce point, qu'elle le serait par autant distincts animés chacun de l'un de ces mouvements composants.“ (Compt. rend. XXVII, p. 455, 1848.)

[2]) Pogg. Ann. LX, S. 499, 1843; LXIII, S. 353 und 368, 1844; LXVIII, S. 449, 1846.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

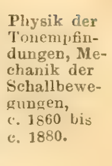
geben [1]). In diesem Sinne bemühte er sich zuerst nachzuweisen, dass den in einer Klangmasse enthaltenen einfachen Partialtönen

---

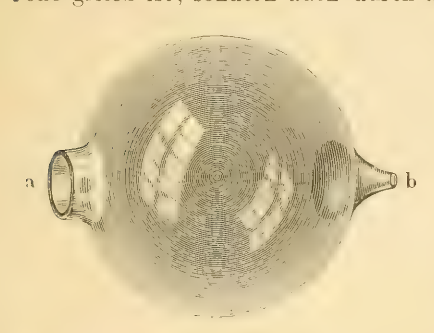
[1]) Diese Idee, wie einige daraus folgende, hat S. Brandt in einer kleinen Abhandlung: „Ueber die Verschiedenheit des Klanges“, von 11 Octavseiten kurz vor Helmholtz wieder ausgesprochen. (Pogg. Ann. CXII, S. 324 bis 336.) Zur Stütze derselben bringt er Folgendes bei: „Die Zahl der Obertöne in ihren verschiedenen Verhältnissen der Intensität und Tonhöhe geben genug Elemente, um die Verschiedenheit der Klangfarbe erklären zu können. Bei schwingenden Saiten und Luftsäulen gelingt es auch dem geübten Ohre, die Obertöne vom Grundtone wie unter sich zu scheiden. Bei Darmsaiten hört man nur 7 bis 8 Obertöne, bei Messingsaiten über 13; in dem Gemische von nahe auf einander folgenden hohen Tönen mag wohl der metallische Charakter des Klanges der letzteren liegen. Auch bei Metall- und Holzpfeifen zeigt sich ein ähnliches Ueberwiegen der hohen Obertöne in dem Klange der ersteren. Auf solchen verschiedenen Obertönen beruht wohl auch der Unterschied der Vocale, deren Obertöne vom u bis zum i mit der Höhe immer mehr an Intensität gewinnen. Ueberzeugender als das ist aber vielleicht die Thatsache, dass man bei derselben Saite durch Anreissen an verschiedenen Stellen auch verschiedene Obertöne zum Verschwinden bringen kann und dass dadurch auch der Charakter des Tones (die Klangfarbe) sich wesentlich ändert. Besonders fällt der hohle, gleichsam leere Ton auf, den man erhält, wenn man sie gerade in der Mitte, und der scharfe, helle Ton, wenn man sie nahe am Ende anschlägt. Folgende Beispiele werden das erläutern. Das erste giebt zu dem



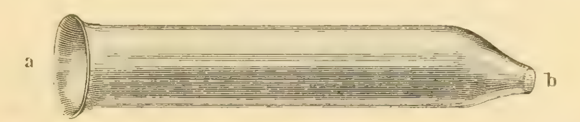

grossen C die Obertöne, welche man erhält, wenn die Saite in einem Punkte angegriffen wird, der sie in irgend einem irrationalen Verhältnisse theilt, das zweite die Obertöne, wenn die Saite in der Mitte, das dritte, wenn sie bei $1/3$ oder $2/3$ ihrer Länge, das vierte, wenn sie bei $1/4$ oder $3/4$ ihrer Länge angerissen werden. Diese Tonfolgen sind vollständig übereinstimmend sowohl durch Versuche als durch Rechnung (mittelst der Fourier'schen Reihe) abgeleitet worden.“ Auch bei der Sirene hat Brandt, entgegen den Beobachtungen Seebeck's, solche Obertöne wahrgenommen. Brandt sagt in einer Anmerkung zu seiner Abhandlung: „Der nachfolgende Aufsatz ist von mir im Sommer 1855 in wenigen Tagen flüchtig hingeworfen, nicht um ihn zu veröffentlichen, sondern nur zu dem Zwecke, um ihn Herrn Prof. Helmholtz vorzulegen. Dieser Gelehrte sprach sich anerkennend darüber aus und wies darauf hin, dass seiner Meinung nach die Andeutung über den Zusammenhang der Klangfarbe mit den Vocallauten der interessantere Theil der Arbeit sei und eine nähere Untersuchung verdiene. Mehrere Jahre später, nachdem unterdessen seine geniale Arbeit über die Klangfarbe der Vocale bekannt geworden war, liess er mir durch Herrn Prof. Richelot sein Bedauern aussprechen, dass ich den Aufsatz nicht veröffentlicht habe, und mich auffordern, es nachträglich zu thun. Diesem Wunsche komme ich hiermit nach.“ Uebrigens hatte Haldat im Jahre 1851 ebenfalls die Ansicht ausgesprochen, dass die Verschiedenheit des Klanges von


Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

besondere *mechanische* Wirkungen in der Aussenwelt zukommen, welche *unabhängig vom menschlichen Ohre* und seinen Empfindungen und unabhängig von bloss theoretischen Betrachtungen der Zerlegung der zusammengesetzten Schwingungsformen in einfache, pendelartige Schwingungen auch eine besondere *objectiv gültige* Bedeutung zusprechen lassen. Dazu benutzte er vor Allem die Erscheinungen der *Resonanz*. Er zeigte, dass eine gespannte Membran nicht nur durch Klänge zum Mitschwingen angeregt wird, deren Tonhöhe ihrem eigenen Tone gleich ist, sondern auch durch andere, in welchen der eigene Ton der Membran nur als *Oberton* enthalten, und wies ähnliche, wenn auch complicirtere Verhältnisse, bei gespannten Saiten, wie überhaupt bei allen elastischen Körpern nach. Am meisten aber empfahl er, zu Untersuchungen eines Klanges auf die in ihm enthaltenen Obertöne, ihrer grossen Empfindlichkeit wegen, die von ihm construirten *Resonatoren*, d. h. gläserne oder metallene




Hohlkugeln oder Röhren, wie sie beistehend abgebildet sind, zu verwenden. Setzt man dieselben mit ihrer engeren Oeffnung möglichst




luftdicht in die Oeffnung des Ohres, so hört man die meisten Töne, welche in der Umgebung hervorgebracht werden, viel gedämpfter als sonst, dagegen schmettert der Oberton eines Klanges, der nach den Abmessungen des Resonators dem Eigentone desselben entspricht, mit gewaltiger Stärke in das Ohr hinein.

In diesen Apparaten hatte Helmholtz das Hülfsmittel geschaffen, mit denen auch Ungeübte und musikalisch Unbegabte jeden Klang in Bezug auf seine *Tonzusammensetzung* analysiren konnten, und hatte so seine Theorie der Klangfarbe auch der Allgemeinheit erweislich gemacht[1]). Er hält danach für erwiesen, *dass jeder einzelne Par-*

---

den Obertönen herrühren möge, welche die Haupttöne begleiten. (Compt. rend. XXXIII, p. 503, 1851.)

[1]) *Helmholtz* beschreibt diese Resonatoren schon in seiner Abhandlung: „Ueber die Klangfarbe der Vocale", die am 2. April 1859 in der Sitzung der K. Bayr. Akad. d. Wissensch. gelesen wurde. (Pogg. Ann. CVIII, S. 287, 1859.) *Brandt* äusserte sich in der erwähnten Arbeit über die Unterscheidung der Obertöne noch sehr resignirt; er meinte, dass nur ein besonders gutes Gehör

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

tialton durch rein mechanische Hülfsmittel, wie mittönende Körper, aus einer Klangmasse gesondert werden kann, und dass jeder einzelne Partialton in dem Klange, den ein musikalisches Instrument hervorbringt, ebenso gut und in demselben Sinne existirt, wie z. B. in dem weissen Lichte, das von der Sonne oder einem glühenden Körper ausgeht, die verschiedenen Farben des Regenbogens existiren. Nachdem dann Helmholtz noch in einem Abschnitte untersucht, in wie weit die Obertöne auch ohne künstliche Hülfsmittel durch das Ohr unterschieden und vom Grundton gesondert empfunden werden können, kommt er zu folgenden Resultaten: „1) Dass die Obertöne, welche den einfachen Schwingungen einer zusammengesetzten Luftbewegung entsprechen, empfunden (percipirt) werden, wenn sie auch nicht immer zur bewussten Wahrnehmung kommen (nicht appercipirt werden). 2) Dass sie ohne andere Hülfe, als eine zweckmässige Leitung der Aufmerksamkeit, auch zur bewussten Wahrnehmung gebracht oder appercipirt werden können. 3) Dass sie aber auch in dem Falle, wo sie nicht isolirt wahrgenommen werden, sondern in der ganzen Klangmasse verschmelzen, doch ihre Existenz in der Empfindung erweisen durch die Veränderung der Klangfarbe, wobei sich namentlich auch der Eindruck ihrer grösseren Tonhöhe in charakteristischer Weise dadurch äussert, dass die Klangfarbe heller und höher erscheint“ [1]). Uebrigens muss Helmholtz doch den Begriff der Klangfarbe gegenüber der herrschenden, vagen Vorstellung etwas beschränken. Er schliesst also von derselben ausdrücklich Manches aus, was man bis jetzt immer mit ihr zusammengefasst hatte, also alle Eigenthümlichkeiten, die der Klang nur erhält durch mehr oder weniger allmäliges Einsetzen und Erlöschen des Tones, sowie durch die besonderen, den Ton immer begleitenden Geräusche, wie sie unsere Consonanten, aber auch die Töne von Blasinstrumenten etc. charakterisiren; und er versteht danach unter musikalischer Klangfarbe nur die Eigenthümlichkeiten des Klanges, welche einer gleichmässig anhaltenden und regelmässig periodischen Luftbewegung entsprechen, die also nur durch das Auftreten der Obertöne erklärt werden können.

Die Abhängigkeit der verschiedenen Klangfarben von den verschiedenen mitklingenden Obertönen wird dann im Einzelnen untersucht, und die Resultate dieser Untersuchungen sind in den folgenden Sätzen

---

dazu befähige, und bedauerte, dass danach das Interesse an diesen Fragen immer nur ein sehr vereinzeltes und die Hoffnung auf ihre Erledigung nur eine sehr geringe sein würde. (Pogg. Ann. CXII, S. 336.)

[1]) Die Lehre von den Tonempfindungen, 4. Aufl., Braunschweig 1877, S. 111 bis 112.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

enthalten: „1) Einfache Töne, wie die der Stimmgabeln mit Resonanzröhren, der weiten gedackten Orgelpfeifen, klingen sehr weich und angenehm, ohne alle Rauhigkeit, aber unkräftig und in der Tiefe dumpf. 2) Klänge, welche von einer Reihe ihrer niederen Obertöne bis etwa zum sechsten hinauf in mässiger Stärke begleitet sind, sind klangvoller, musikalischer. Sie haben, mit den einfachen Tönen verglichen, etwas Reicheres und Prächtigeres, sind aber vollkommen wohllautend und weich, so lange die höheren Obertöne fehlen. Hierher gehören die Klänge des Fortepiano, der offenen Orgelpfeifen, die weicheren Pianotöne der menschlichen Stimmen und des Horns, welche letzteren den Uebergang zu den Klängen mit hohen Obertönen machen, während die Flöten und schwach angeblasenen Flötenregister der Orgel sich den einfachen Tönen nähern. 3) Wenn nur die ungeradzähligen Obertöne da sind, wie bei den engen, gedackten Orgelpfeifen, den in der Mitte angeschlagenen Fortepianosaiten und der Clarinette, so bekommt der Klang einen hohlen oder bei einer grösseren Zahl von Obertönen einen näselnden Charakter. Wenn der Grundton an Stärke überwiegt, ist der Klang voll; leer dagegen, wenn jener an Stärke den Obertönen nicht hinreichend überlegen ist. So ist der Klang weiter, offener Orgelpfeifen voller als der von engeren, der Klang der Saiten voller, wenn sie mit den Hämmern des Pianoforte angeschlagen werden, als wenn es mit einem Stöckchen geschieht, oder wenn sie mit den Fingern gerissen werden, der Ton von Zungenpfeifen mit passendem Ansatz voller als von solchen ohne Ansatzrohr. 4) Wenn die höheren Obertöne jenseits des sechsten oder siebenten sehr deutlich sind, wird der Klang scharf und rauh. Den Grund davon werden wir später in den Dissonanzen nachweisen, welche die höheren Obertöne mit einander bilden. Der Grad der Schärfe kann verschieden sein; bei geringerer Stärke beeinträchtigen die hohen Obertöne die musikalische Brauchbarkeit nicht wesentlich, sind im Gegentheil günstig für die Charakteristik und Ausdrucksfähigkeit der Musik. Von dieser Art sind besonders wichtig die Klänge der Streichinstrumente, ferner die meisten Zungenpfeifen, Oboe, Fagott, Physharmonica, menschliche Stimme. Die rauheren, schmetternden Klänge der Blechinstrumente sind ausserordentlich durchdringend und machen deshalb mehr den Eindruck grosser Kraft als ähnliche Klänge von weicherer Klangfarbe. Sie sind deshalb für sich allein wenig geeignet zur künstlerischen Musik, aber von grosser Wirkung im Orchester. In welcher Weise die hohen dissonirenden Obertöne den Klang durchdringender machen können, wird sich später ergeben“ [1]).

Der am meisten Aufsehen erregende, glänzendste Erfolg der Helmholtz'schen Untersuchungen war jedenfalls die Synthese der Vocal-

[1]) Die Lehre von den Tonempfindungen, 4. Aufl., S. 192 bis 193.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

klänge[1]). Durch sehr sinnreich ausgedachte Apparate erhielt Helmholtz eine Reihe abgestimmter Stimmgabeln beliebig lange in Schwingungen[2]) und machte ihre Töne durch Resonatoren beliebig hörbar oder nicht. Im Anfange wandte er bei seinen Versuchen eine Gabel mit der Tonhöhe *B* als Grundton und sieben weitere Gabeln mit den Tönen *b*, *f'*, *b'*, *d''*, *f''*, *as''* und *b''* als Obertöne an. Oeffnete man den Resonator vor der Gabel *B*, so hörte man ein dumpfes *U*, das durch Mitklingen von *b* und *f''* dem von einer Bassstimme gesungenen *U* ähnlich wurde. Der Vocal *O* entstand durch schwaches Tönen von *B*, starkes Tönen von *b* und schwaches Mitklingen von *b'*, *f'*, und *d''*. *A* oder richtiger *Å* erhielt man, indem man die höchsten Obertöne vom fünften bis zum achten möglichst hervortreten liess. Zum Hervorbringen der höheren Vocale aber musste Helmholtz seinen Gabeln noch vier weitere mit den Tönen *d'''*, *f'''*, *as'''* und *b'''* hinzufügen. Wenn er dann *b* als Grundton nahm, erzeugte er den Vocal *A* durch mässig starkes Mitklingen von *b'* und *f''* und kräftiges Klingen von *b''* und *d'''*. Um *A* in *Ae* überzuführen, muss man *b'* und *f''* etwas verstärken, *b''* dämpfen und dagegen *d'''* und *f'''* möglichst hervortreten lassen. Für *E* muss man die beiden tiefsten Töne der Reihe *b* und *b'* mässig stark halten und die höchsten *f'''*, *as'''* und *b'''* möglichst hervortreten lassen. Der Vocal *I* endlich war auch mit dieser Reihe von Gabeln noch nicht zu erreichen[3]).

Nach dieser gelungenen Synthese ergab aber die Analyse der gesprochenen Vocale immer noch ein sehr überraschendes Resultat. Helmholtz fand nämlich, dass die Vocaltöne des Mundes nicht erzeugt wer-

---

[1]) Rob. Willis (1800 bis 1875, Geistlicher, auch Professor der Physik) versuchte 1829 die Vocale durch Zungenpfeifen nachzubilden. (Transact. of the Cambridge Phil. Soc. III, p. 231, 1829.) Wheatstone behauptete in einer Kritik dieser Versuche die Zusammensetzung der Vocale aus Grund- und Obertönen. (Lond. and Westminster Review, October 1837.)

[2]) Helmholtz gebrauchte hierzu intermittirende Elektromagnete, deren Intermittenz selbst wieder durch eine Stimmgabel bestimmt wurde, die nach Art eines Neef'schen Hammers den galvanischen Strom öffnete und schloss und dadurch selbst in Schwingungen erhalten wurde. Rud. König benutzte seit 1866 zur dauernden Erhaltung des Tönens bei einer Stimmgabel ein Uhrwerk, dessen Gang von der Stimmgabel mittelst des Echappements regulirt wurde, das aber auch bei jeder Schwingung der Gabel selbst einen Impuls gab, vermöge dessen die Bewegung derselben gleichmässig blieb. (Jahrb. der Erfindungen XVI, S. 114.)

[3]) „Aehnlich wie die genannten Vocale der menschlichen Stimme, bemerkt Helmholtz hierbei, lassen sich auch Töne von Orgelpfeifen verschiedener Register nachahmen, vorausgesetzt, dass sie nicht zu hohe Nebentöne geben; doch fehlt den nachgeahmten Tönen das scharfe sausende Geräusch, welches der an der Lippe der Pfeife gebrochene Luftstrom giebt. Die Stimmgabeln sind eben darauf beschränkt, den rein musikalischen Theil des Klanges nachzuahmen. Für die Nachahmung der Zungeninstrumente fehlen die scharfen hohen Obertöne, doch lässt sich das näselnde der Clarinette durch eine Reihe ungerader Obertöne nachahmen und die weicheren Töne des Hornes durch den vollen Chor sämmtlicher Gabeln."

den durch Obertöne, die immer dasselbe Verhältniss zum Grundtone halten, sondern dass diese Obertöne eine vom Grundton unabhängige absolute Höhe haben. Für den Vocal *U* sind nach ihm der Partialton *f*, für *O* der Partialton $b^1$, für *A* der Partialton $b^2$, für *E* sind die Partialtöne $b^3$ und $f^1$ und für *I* endlich die Partialtöne $d^4$ und *f* charakteristisch. Er erklärt dies daraus, dass diese Obertöne nicht eigenthümliche Obertöne des im Kehlkopf hervorgebrachten Klanges, sondern Resonanztöne des Halses und des Mundes sind, die gerade den ihnen entsprechenden Oberton des gesungenen oder gesprochenen Klanges allein verstärken und hervorheben. Da nun diese Resonanztöne des Mundes je nach der Tonhöhe des gesungenen Vocals ebenso auf erste als letzte Obertöne desselben treffen können, so begreift sich danach, warum gewisse Vocale auf gewisse Noten leichter ansprechen als auf andere. Bei aller Uebereinstimmung im Allgemeinen sind indess in dieser Analyse der Vocalklänge andere Forscher im Speciellen zu abweichenden, ja theilweise principiell abweichenden Resultaten gekommen, und bei der Verschiedenheit der Aussprache sowie der Einwirkung mancher anderer Nebenumstände erscheint das ebenso natürlich als ein wirklicher Entscheid schwierig. Helmholtz bemerkte selbst, dass schon vor ihm ausgeführte Messungen der charakteristischen Vocaltöne nicht ganz mit den seinigen übereinstimmten[1]). Nach ihm hat Rud. König[2]) in ähnlicher Weise wie er selbst diese Töne untersucht, dabei aber auch wieder abweichend für die fünf Vocale *U*, *O*, *A*, *E*, *I* die fünf Octaven *b*, $b^1$, $b^2$, $b^3$, $b^4$ als charakteristische Obertöne gefunden. König nimmt die Regelmässigkeit dieser Reihenfolge als Beweisgrund für seine Meinung in Anspruch und findet in der Einfachheit dieser Verhältnisse die physiologische Ursache dafür, dass wir in den verschiedenen Sprachen immer ungefähr dieselben fünf Vocale wieder antreffen, obgleich die menschliche Stimme deren eine unendliche Menge hervorzubringen vermag. v. Zahn[3]) kam durch sehr zahlreiche Versuche zu dem Ergebniss, dass überhaupt ein Vocalklang nicht durch eine oder zwei feste Noten charakterisirt wird, sondern dass vielmehr das specifisch Bezeichnende im Erklingen einer harmonischen Folge von mehr oder weniger distanten Tönen liegt. E. van Quanten[4]) endlich bestritt geradezu, dass die charakteristischen Vocaltöne feste Töne seien, und behauptete,

Physik der Tonempfindungen. Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

---

[1]) Helmholtz' erste Abhandlung „Ueber die Klangfarbe der Vocale“ erschien Pogg. Ann. CVIII, S. 280, 1859; kurz vorher hatten Merkel (Anthropophonik, Leipzig 1857) und ausführlicher Donders (Arch. f. holländische Beitr. zur Natur- und Heilkunde I, 1858) die Resonanztöne des Mundes beim Aussprechen der einzelnen Vocale untersucht.

[2]) Compt. rend. LXX, p. 931, 1870. — R. König, Akustiker in Paris.

[3]) Osterprogramm der Thomasschule in Leipzig 1871; Referat im Jahrb. d. Erfind. VII, S. 93, 1871. — Professor v. Zahn, Mathematiker a. d. Thomasschule in Leipzig.

[4]) Pogg. Ann. CLIV, S. 272 und 522, 1875.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

dass einem tieferen Grundton auch ein tieferer und einem höheren Grundton ein höherer charakteristischer Vocalton entspreche. Felix Auerbach[1]) dagegen versuchte einen Mittelweg einzuschlagen, indem er in jedem Vocalklange zwei Elemente, ein absolutes und ein relatives, unterschied, und auch neuere Arbeiten von Herm. Grassmann[2]), wie von Fleeming Jenkin und J. A. Ewing[3]) lassen die Vereinigung der entgegenstehenden Ansichten auf solcher Basis als möglich erscheinen. Sicher bleibt durch die Untersuchungen von Helmholtz jedenfalls die Erklärung des Vocalklanges aus der Verstärkung, welche gewisse Obertöne eines gesungenen oder gesprochenen Tones durch die Resonanz der Mundhöhle erfahren.

Weiter fortschreitend in seinem Thema von der Klangfarbe der Töne constatirt Helmholtz danach, dass die Unterschiede der musikalischen Klangfarbe nur abhängen von der Anwesenheit und Stärke der Partialtöne, nicht aber von ihren Phasenunterschieden, und führt die Fähigkeit des Ohres, zusammengesetzte Klänge in ihre einfachen Töne zu zerlegen, auf seine anatomische Gestaltung, vor Allem die Einrichtung des Corti'schen Organs zurück. Damit schliesst das Capitel von der Beschaffenheit einzelner Klänge, und Helmholtz geht nun zur Untersuchung des Zusammenklingens mehrerer Klänge über. Beim Zusammenklange zweier verschieden hoher Töne entstehen zweierlei Arten von neuen Klangerscheinungen, nämlich Schwebungen oder Stösse und Combinationstöne. Früher nahm man nur eine graduelle Verschiedenheit zwischen diesen beiden an, so dass die Schwebungen, wenn sie schnell genug erfolgten, als Combinationstöne empfunden werden sollten. Helmholtz aber weist eine generelle Verschiedenheit der beiden Erscheinungen nach. Die Schwebungen sind reine Interferenzerscheinungen. Treffen zwei Wellen von gleicher Schwingungsperiode in verschiedenen Schwingungsphasen zusammen, so werden dieselben je nach dem Phasenunterschied sich gegenseitig verstärken oder schwächen. Diese Veränderung wird eine gleichmässig dauernde und der eine hörbare Ton ein ganz unveränderlicher sein. Treffen aber Wellen von verschiedener Schwingungsdauer zusammen, so werden sich diese je nach dem Verhältnisse ihrer Schwingungszahlen in gewissen Perioden verstärken und auslöschen, und diese Abschwächungen und Verstärkungen empfindet unser Ohr bei Tönen als Stösse oder Schwebungen. Für diese Schwebungen gilt das schon von Hällström aufgestellte Gesetz[4]). Die Anzahl der Schwebungen in

---

[1]) Pogg. Ann. Ergänzungsb. VIII, S. 177. — F. Auerbach, geboren am 12. Nov. 1856, Docent an der Universität Breslau.

[2]) Wiedemann's Ann. I, S. 606, 1877.

[3]) Nature XVIII, p. 340, 394, 454, 1878. — Jenkin und Ewing benutzten bei ihren Untersuchungen die vom Phonographen aufgezeichneten Curven, die sie in stark vergrössertem Maassstabe abbildeten.

[4]) Siehe S. 272 dieses Bandes.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

einer gegebenen Zeit ist gleich der Differenz der Anzahl der Schwingungen, welche die beiden Klänge in derselben Zeit ausführen. Nun folgen zwar die seit langer Zeit bekannten Combinationstöne diesem Gesetze ebenfalls, aber trotzdem ist die Entstehung der Combinationstöne im Allgemeinen nicht auf die Schwebungen zurückzuführen. Helmholtz hat auch neben jener Art von Combinationstönen, die er nach Hällström's Gesetze als Differenztöne bezeichnet, noch eine neue Art von Combinationstönen entdeckt, die er Summationstöne nennt, weil ihre Schwingungszahlen den Summen der Schwingungszahlen der sie erzeugenden Töne gleich sind [1]). Die Ursachen der Combinationstöne überhaupt aber sind nach ihm in folgender Weise zu fassen. „Während man bisher immer angenommen hat, dass verschiedene Tonwellenzüge, welche gleichzeitig in der Luft oder einem anderen elastischen Mittel erregt werden, sich einfach superponiren, ohne gegenseitig Einfluss auf einander zu haben, und man diese Annahme durch die bekannten Erfahrungen der Möglichkeit, gleichzeitig erklingende Töne verschiedener Instrumente oder menschlicher Stimmen, jede mit ihrer besonderen Tonhöhe und ihrer Klangfarbe, neben einander zu erkennen, hinreichend gerechtfertigt glaubte: so war doch andererseits zu bedenken, dass die theoretische Mechanik eine solche ungestörte Superposition nur für den Fall unendlich kleiner Schwingungen nachwies, während aus den Bewegungsgleichungen der Luft gleichzeitig ersehen werden konnte, dass bei Wellenzügen von endlicher Grösse der Amplituden eine solche ungestörte Superposition nicht stattfinden kann. Die theoretische Untersuchung der letztgenannten Fälle ergab mir nun, dass verschiedene einfache Schwingungsbewegungen eines elastischen Körpers sich ungestört superponiren, so lange die Amplituden der Schwingungen so klein sind, dass die durch die Verschiebungen hervorgebrachten Bewegungskräfte diesen Verschiebungen selbst merklich proportional sind. Wenn aber die Amplituden der Schwingungen so gross werden, dass die Quadrate der Verschiebungen einen merklichen Einfluss auf die Grösse der Bewegungskräfte erhalten, so entstehen neue Systeme einfacher Schwingungsbewegungen, deren Schwingungsdauer derjenigen der bekannten Combinationstöne entspricht" [2]). Combinationstöne sind nur zu

---

[1]) Eine Arbeit über Combinationstöne ist die erste akustische Originalabhandlung, die Helmholtz veröffentlicht hat. (Vorher hatte er nur die akustischen Referate für die „Fortschritte der Physik" in den Jahren 1848 und 1849 geliefert.) Die erste Mittheilung wurde am 22. Mai 1856 in der Berliner Akademie gelesen, die ausführliche Abhandlung steht in Pogg. Ann. XCIX, S. 497, 1856. Dort heisst es: „Wenn also auch die Ursachen der wahrgenommenen Combinationstöne sich in Bezug auf ihre Höhe unter Hällström's Gesetz bringen lassen, so scheinen doch ihre Ordnung und die Bedingungen ihrer Entstehung noch zweifelhaft zu bleiben" (S. 500).

[2]) Pogg. Ann. XCIX, S. 531 bis 532. Wissensch. Abhandl. I, S. 295.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

hören, wenn zwei musikalische Töne von verschiedener Höhe gleichzeitig kräftig und gleichmässig angegeben werden; in diesem Falle darf man eben nicht wie bei der gewöhnlichen Interferenzbetrachtung die resultirende Bewegung einfach für die algebraische Summe der componirenden Bewegungen ansehen, sondern muss auf die wirkenden Kräfte direct zurückgehen. Helmholtz setzt die Kraft, welche unter solchen Umständen nach einer Verschiebung um die Strecke $x$ in einem elastischen Mittel einen Massenpunkt $m$ in seine Gleichgewichtslage zurückzuführen strebt, gleich $ax + bx^2$. Wirken dann auf denselben Punkt zwei Wellenzüge mit den Kräften $f \sin(pt)$ [1]) und $g \sin(qt + c)$, so ist seine Bewegungsgleichung:

$$-m\frac{d^2x}{dt^2} = ax + bx^2 + f\sin(pt) + g\sin(qt + c).$$

Diese Gleichung kann man durch eine Reihe integriren, indem man darin

$$x = \varepsilon x_1 + \varepsilon^2 x_2 + \varepsilon^3 x_3 + \cdots$$
$$f = \varepsilon f_1,$$
$$g = \varepsilon g_1$$

und dann die mit gleichen Potenzen von $\varepsilon$ multiplicirten Glieder einzeln gleich Null setzt. Dann kommt:

$$1)\quad ax_1 + \frac{d^2x_1}{dt^2} = -f_1\sin(pt) - g_1\sin(qt + c),$$

$$2)\quad ax_2 + \frac{d^2x_2}{dt^2} = -bx_1^2,$$

$$3)\quad ax_3 + m\frac{d^2x_3}{dt^2} = -2bx_1x_2 \text{ u. s. w.}$$

Aus der Gleichung 1) ergiebt sich durch die Integration, wenn

$$\frac{f_1}{mp^2 - a} = u \quad \text{und} \quad \frac{g_1}{mq^2 - a} = v$$

gesetzt wird:

$$x_1 = A\sin\left(t\sqrt{\frac{a}{m}} + b\right) + u\sin(pt) + v\sin(qt + c).$$

Dies ist das bekannte Resultat für unendlich kleine Schwingungen; es giebt drei Töne, den Eigenton des Punktes $m$ und die beiden ihm mitgetheilten, deren Schwingungszahlen $p$ und $q$ sind. Da der Eigenton bald erlischt, so kann man $A$ gleich Null annehmen, und durch Einsetzen von $x_1$ in 2) erhält man dann die weitere Gleichung:

---

[1]) Aus der Seite 724 gegebenen Gleichung $y = A\sin\frac{2\pi}{T}t$ folgt durch Differentiation eine in der Form ganz identische Gleichung für die Kraft der Vibration.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

$$x_2 = -\frac{b}{2a}(u^2 + v^2) - \frac{u^2}{2(4mp^2 - a)} \cos(2pt)$$
$$- \frac{u^2}{2(4mq^2 - a)} \cos 2(qt + c) + \frac{uv}{m(p-q)^2 - a} \cos[(p-q)t - c]$$
$$- \frac{uv}{m(p+q)^2 - a} \cos[(p+q)t + c].$$

Das zweite Glied der Reihe für $x$ enthält also ausser einer Constanten die Töne mit den Schwingungszahlen $2p$, $2q$, $(p-q)$ und $(p+q)$, d. h. die ersten Obertöne von $p$ und $q$, sowie den ersten Differenz- und den ersten Summationston derselben. Die Amplituden dieser Combinationstöne sind dem Producte $uv$ proportional, sind also bei sehr kleinen Amplituden der primären Töne kleine Grössen zweiter Dimension und wachsen mit den Amplituden der primären Töne im quadratischen Verhältniss. Daraus erklärt sich, warum bei schwachen primären Tönen die Combinationstöne unhörbar sind, und zugleich zeigt sich, dass der Summationston immer von noch geringerer Intensität als der Differenzton ist. Aus der Entwickelung auch der höheren Glieder $x_3$, $x_4$ u. s. w. folgen weiter auf ähnliche Weise sowohl die höheren Obertöne als auch die Combinationstöne höherer Ordnung [1]).

Nachdem so Helmholtz die Theorie der Combinationstöne auf neuer Grundlage vollendet und dieselben von den Schwebungen generell ganz getrennt hat, zeigt er damit übereinstimmend, dass die letzteren als Stösse auch in dem Falle noch empfunden werden, dass die Geschwindigkeit ihrer Wiederkehr die untere Grenze unserer Tonwahrnehmung längst überschritten hat. Zwar gelingt es, wenn die Anzahl der Schwebungen über 30 in der Secunde hinausgeht, nicht mehr, dieselben einzeln und getrennt aufzufassen, aber der Eindruck von Stössen macht sich doch noch dadurch bemerklich, dass die Tonmasse wirr erscheint und dass der Zusammenhang knarrend und rauh wird. Merkwürdigerweise hängt die Grenze der Wahrnehmbarkeit der Schwebungen nicht bloss von der Anzahl derselben, sondern auch von dem betreffenden Tonintervall ab, so dass z. B. ein Halbton in der hohen Octave noch wahrnehmbare Schwebungen erzeugt, während das bei einer kleinen Terz der tieferen Octave nicht mehr der Fall ist, obgleich die Schwebungen im ersteren Falle viel schneller auf einander folgen als im letzteren. Helmholtz führt das darauf zurück, dass Schwebungen nur empfunden werden, wenn die afficirten Nervenenden des Corti'schen Organs im Ohre einander noch genügend nahe sind, das betreffende Tonintervall eine gewisse Grenze also nicht übersteigt [2]).

---

[1]) Tonempfindungen, 4. Aufl., S. 650.

[2]) Helmholtz' Entdeckung der Summationstöne wurde im Jahre 1876 durch überzeugende Versuche von Rud. König bestätigt. Er brachte die Summationstöne (um eine Erklärung derselben durch Differenztöne höherer Ordnung

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Die schnellen Schwebungen bilden nun den Ausgangspunkt für ein noch tieferes Eindringen in die Eigenthümlichkeiten unserer Tonempfindungen. Jede intermittirende Erregung unserer Nervenapparate greift dieselben heftiger an, als eine gleichmässig dauernde. Wie eine flackernde Flamme das Auge ermüdet und reizt, so sind Intervalle, die schnelle Schwebungen erzeugen, dem Ohre rauh und unangenehm. Solche Intervalle, welche noch dazu eine wirre Tonmasse bilden, die sich schwer in ihre Elemente zerlegen lässt, erscheinen uns darum als Dissonanzen, während ein Intervall, dessen Töne ohne Schwebungen in ruhigem Flusse neben einander gehen, als eine Consonanz empfunden wird. Wir können unseres physikalischen Zweckes und des Raumes wegen nicht näher darauf eingehen, wie Helmholtz nun nach den Schwebungen der primären Töne, der Obertöne und auch der Combinationstöne die Consonanz sowohl der Intervalle als auch der Accorde abmisst und wie er auf diesem Grunde dann die Fundamentalgesetze der Harmonie aufbaut. Trotzdem wird unsere Ausführung schon erkennen lassen, welch hohen Werth auch für die Physik im engsten Sinne die Arbeit von Helmholtz hat. In glanzvoller Weise hat er an einem Beispiel, klarer und bewusster vielleicht, als es je vor ihm geschehen, gezeigt, wie der Physiker die Eigenthümlichkeiten unserer Empfindungen, ihre Intensitäts- und ihre Qualitätsunterschiede auf Bewegungen oder auf die Umwandlungen von Bewegungen zurückführen und so Empfindungsgrössen sogar dem Mathematiker fassbar machen kann. Gerade in dieser Beziehung hängt auch dieses Werk, das sonst dem Strome der neueren Physik ferner zu stehen scheint, mit dem Ziele derselben, alle natürlichen Vorgänge auf Bewegungen zurückzuführen, eng zusammen. Dass Helmholtz am Schlusse seines Werkes in diesem Vordringen sich selbst als Naturwissenschaftler eine Grenze setzt und ausdrücklich die Aesthetik der Musik, so weit psychische Motive in ihr wirksam werden, von seinem Thema ausschliesst, erscheint als ein

von Obertönen unmöglich zu machen) mit Hülfe von Stimmgabeln, die fast einfache Töne gaben, hervor. Nur in einem Punkte meinte er Helmholtz berichtigen zu müssen. Er zeigte nämlich durch seine isolirten Stimmgabeln mit möglichst einfachen Tönen, dass die Stösse, welche allerdings bei langsamerer Folge die Rauhigkeit des Tones, das Knarrende desselben hervorbringen, doch mit der Erhöhung ihrer Anzahl in Töne übergehen, ja dass alle Intermittenzen, wie z. B. Schwankungen der Intensität, bei genügender Schnelligkeit selbst wieder als Töne empfunden werden. (Pogg. Ann. CLVII, S. 177, 1876.) Helmholtz hat dieser Ansicht König's nicht beigestimmt, der Letztere aber hat an derselben festgehalten und sie im Jahre 1881 (Wiedem. Ann. XII, S. 335) in einer grösseren Arbeit nochmals vertheidigt. Rob. Weber bestätigte dann im Jahre 1885 wieder die Helmholtz'schen Gesetze der Differenz- wie der Summationstöne durch einen von ihm angegebenen Apparat, den er elektrische Sirene nannte. (Wiedem. Ann. XXIV, S. 671, 1885.)

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Beispiel wissenschaftlicher Mässigung, dessen Nachahmung man auch manchen anderen Psychologen und Philosophen anempfehlen dürfte.

Die Folgen der stärkeren Aufmerksamkeit, die Helmholtz auf den Zusammenklang der Töne und damit auf die Zusammensetzung der Schwingungen und Wellenbewegungen gerichtet hatte, zeigte sich bald in der schnellen Construction oder Verbesserung der Apparate zur Zerlegung der zusammengesetzten Klänge, bei denen man nun auch, dem Zuge der Zeit folgend, um eine objective Darstellung oder gar eine sichtbare Fixirung der Erscheinungen sich eifrig bemühte. Früher, wo es sich vor Allem um das Begreifen der Wellenbewegung gehandelt, hatte man Apparate construirt, mit welchen man die Schwingungen und Wellen in ihrem Fortschreiten, wie auch in ihren Zusammensetzungen veranschaulichen konnte. So wandte Joh. Müller 1846 die stroboskopischen Scheiben oder das Lebensrad zur Veranschaulichung von Schwingungs- und Wellenbewegungen mit Hülfe vorgezeichneter Schablonen an [1]). Um dieselbe Zeit begann Wheatstone mit seiner Wellenmaschine die Reihe derjenigen Apparate, bei denen man eine Folge von Nadeln oder auch Pendeln mit glänzenden Knöpfen durch untergeschobene oder auch angelegte Wellenmodelle in bestimmte Wellenformen bringen kann. Dieselbe wurde vor Allem in der verbesserten Einrichtung Fessel's bekannt, und seitdem sind bis auf die neueste Zeit immer noch neue Wellenmaschinen zur bequemeren Veranschaulichung oder auch zur Darstellung neuer Wellencombinationen erfunden worden [2]). Neben diesen Darstellungen von Wellenmodellen bemühte man sich ebenso eifrig um die Construction von Apparaten, welche die directe optische Beobachtung einzelner Schwingungen und ihrer Componenten erleichtern und einer grösseren Exactheit fähig machen sollten. Thomas Young [3]) hatte zum Studium der Saitenschwingungen silberübersponnene Exemplare in einem dunklen Zimmer betrachtet und auf die zu beobachtenden Punkte derselben einen einzelnen kräftigen Lichtstrahl fallen lassen. Wesentlich dieselbe Methode wandte im Jahre 1855 J. A. Lissajous [4]) an, um die Zusammensetzung von

---

[1]) Pogg. Ann. LXVII, S. 271, 1846. — Joh. Heinr. Jac. Müller, 1809 bis 1875, Prof. der Physik in Freiburg i. B.

[2]) Fessel hatte durch Plücker von Wheatstone's Einrichtung der Wellenmaschine gehört (Pogg. Ann. LXXVIII, S. 421, 1851). Mach's phoronomische Wellenmaschine (Carl's Repertorium f. Experimentalphysik VI, S. 8, 1871) dient sowohl zur Darstellung fortlaufender und stehender transversaler, wie auch longitudinaler Wellen. Melde construirte (Pogg. Ann., Jubelband, S. 101, 1874) einen Apparat zur Darstellung von Wellenflächen. Pfaundler richtete den alten Stäbchenapparat in sehr sinnreicher Weise für die Composition beliebig vieler in einer Ebene liegender Wellenlinien ein. (Tageblatt der 60. Naturforschervers. Wiesbaden 1887, S. 82.)

[3]) Outlines of exp. and inquiries resp. sound and light, Phil. Trans. 1800, abgedr. in Lect. on nat. phil. II, 1807. — Nach Pisko (Die neuen Apparate der Akustik, Wien 1865, S. 116) haben F. G. v. Busse und Chladni ähnliche Beobachtungen schon vor Young gemacht.

[4]) Compt. rend. XLI, p. 93 und 814 u. s. w.; ausführlich in Ann. de chim.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Schwingungen zu beobachten und dadurch auch die Schwingungen eines zu untersuchenden Körpers mit den Normalschwingungen eines anderen zu vergleichen. Zu dem Zwecke versah er die beiden schwingenden Körper, gewöhnlich zwei Stimmgabeln, deren Schwingungen combinirt und verglichen werden sollten, mit kleinen Spiegeln in solcher Weise, dass ein starker Lichtstrahl, der auf den einen Spiegel fiel, von diesem auf den Spiegel des anderen Körpers und danach zur Beobachtung auf einen geeigneten Schirm reflectirt wurde. Meist stellte Lissajous die schwingenden Körper so auf, dass ihre Schwingungen senkrecht zu einander waren; bei dem Einklange der letzteren erhielt er dann auf dem Schirme eine leuchtende Ellipse, bei anderen Klangverhältnissen aber verwickeltere Lichtfiguren, die man nach seinem Namen genannt hat. Zur genaueren, allerdings nur subjectiven Betrachtung dieser Figuren brachte er auch an dem Vergleichskörper statt des Spiegels das Objectiv eines kleinen Fernrohres so an, dass der von dem ersten schwingenden Körper gespiegelte Lichtstrahl durch dieses schwingende Objectiv ging und danach durch das darüber feststehende Ocular betrachtet werden konnte. Diesen letzteren Apparat wandte mit einigen Abänderungen auch Helmholtz als Vibrationsmikroskop bei seinen Untersuchungen an. Lissajous gebrauchte seinen Apparat zu einem eingehenden Studium der Combinationen der Schwingungen und der Töne, benutzte denselben aber besonders auch zur Prüfung der Normalstimmgabeln, mit der er in Frankreich beauftragt und für welche seit 1859 ein Normal- *a* von 870 (Halb-) Schwingungen festgesetzt war [1]).

Zur Betrachtung der Luftschwingungen und damit zur Einstimmung von Blasinstrumenten war die Lissajous'sche Methode natürlich nicht unmittelbar, sondern nur mittelbar dadurch anwendbar, dass man die Luftschwingungen auf leichte, feste Körper, am besten wohl dünne Membranen, übertrug. Diese letztere Uebertragung benutzte

---

et de phys. (3) LI, p. 147, 1857. Das Kaleidophon (bestehend aus elastischen Stäben, die an dem einen Ende festgeklemmt waren und an dem anderen spiegelnde Kugelflächen trugen), welches Wheatstone im Jahre 1827 beschrieb, beruhte ebenfalls auf der Idee Young's, war aber wissenschaftlich noch wenig fruchtbar. (Pogg. Ann. X, S. 470.) Erst Melde wandelte 1862 dasselbe in ein Universalkaleidophon um, mit dem man die Zusammensetzung beliebiger rechtwinkliger Schwingungen sehr bequem zeigen kann. In dieser Einrichtung besteht es aus einem federnden, mit einem Ende an einem Tische festgeklemmten Streifen, an dessen anderem Ende ein kleinerer Streifen mit seiner Ebene senkrecht zur Ebene des ersteren befestigt ist. Dieser letztere ist in einer Klammer verschiebbar und trägt an seinem oberen Ende einen glänzenden Knopf. (Pogg. Ann. CXV, S. 118, 1862.) — Jul. Ant. Lissajous, 1822 bis 1880, Prof. am Collège Saint Louis in Paris.

[1]) Nach Lissajous (Cosmos VI, p. 598, 1855) nahm Sauveur das *a* zu 810, Delezenne dasselbe 1808 zu 853 bis 880 an; nach Scheibler hatte 1834 das *a* der Pariser Oper 867,5, das *a* des Conservatoire 870 Schwingungen; 1855 aber machte das *a* der Pariser Oper 898, das der Oper in Lille gar 901 Schwingungen. Eine Verordnung vom 16. Februar 1859 setzte für Frankreich das Normal-*a* auf 870 Schwingungen fest.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

zuerst E. L. Scott im Jahre 1859, sah aber dabei ganz von der Lissajous'schen Erzeugung von Lichtlinien ab und zog es vor, die Schwingungen der Membranen direct durch einen Schreibstift aufzeichnen zu lassen. Diese graphische Methode war indessen nicht sein Eigenthum, sondern ist vor ihm schon mehrfach in verschiedenartiger Weise angewandt worden. W. Weber liess um das Jahr 1830 [1]) durch eine Stimmgabel ihre eigenen Schwingungscurven aufzeichnen, indem er einen Zinken derselben mit einer elastischen Spitze versah und sie während des Tönens gleichmässig über eine berusste Glastafel hinwegführte, so dass die Spitze die Tafel leicht berührte. Duhamel stellte die elastischen Schreibspitzen, die er an schwingenden Saiten oder Stäben befestigt hatte, einem berussten Cylinder gegenüber, den er mit Hülfe einer Kurbel um eine schraubenförmige Achse drehte [2]). Die Wellenberge und Wellenthäler, die man bei solchen Aufzeichnungen in einer gewissen Zeit erhält, bestimmen die absolute Schwingungsanzahl während dieser Zeit; rückwärts aber kann man bei bestimmter Schwingungsgeschwindigkeit aus der Anzahl der aufgezeichneten Schwingungen auch auf die verflossene Zeit schliessen. Die graphischen Vibroskope waren also umgekehrt auch als Chronoskope zu gebrauchen, und gerade dieser Umstand förderte ihre Entwickelung bedeutend. Wertheim, dem bald darauf bei Benutzung der Duhamel'schen Methode die Drehung des Cylinders nicht gleichmässig genug und damit die Zeitbestimmung zu unsicher erschien, fügte dem Apparate eine schreibende Normalstimmgabel hinzu, die 256 Schwingungen in der Secunde machte, und erklärte danach die Zeit bis auf $^1/_{2560}$ Secunde genau bestimmen zu können [3]).

Indessen wurde die Umwandlung der Vibroskope zu Zeit messenden Instrumenten erst später bewusst gefördert, und der Gedanke der Chronoskopie hat sich auch zuerst von anderer Seite her entwickelt. Pouillet versuchte im Jahre 1844 [4]) sehr kleine Zeittheile dadurch genau zu messen, dass er den Ausschlag einer Galvanometer-

[1]) Schilling's musikalisches Lexikon, I. Bd., Artikel Akustik von W. Weber, Stuttgart 1830; nach Pisko, Die neueren Apparate der Akustik, S. 238.

[2]) Compt. rend. XI, p. 15, 1840; Pogg. Ann. LVII, S. 392. Duhamel bemerkt, dass schon Watt und später Eytelwein Bewegungen auf diese Weise hätten aufzeichnen lassen und dass er das Verfahren schon vor 15 Jahren erdacht habe. Pisko (Die neueren Apparate, S. 238) behauptet, dass in dem Collège de France unter den älteren Apparaten ein solcher Schreibcylinder sich befinde, den Savart bei seinen Versuchen benutzt, und vermuthet, dass der Grundgedanke des Apparates von dem Letzteren herrühre. Nach dem Obigen hätte die Vermuthung nicht viel Wahrscheinliches.

[3]) Compt. rend. XV, p. 112, 1842; Pogg. Ann. LVII, S. 382; in der Abhandlung Recherches sur l'élasticité et la tenacité des métaux.

[4]) Compt. rend. XIX, p. 1384, 1844; Pogg. Ann. LXIV, S. 452. — Nach Poggendorff (Pogg. Ann. LXIV, S. 466) haben vor Pouillet schon Morin, Dupré u. A. ähnliche Methoden der Zeitmessung angewandt. Auch Jacobi nimmt die Priorität Pouillet gegenüber für sich in Anspruch. (Vergl. auch Fortschritte der Physik im Jahre 1845, I, S. 46.)

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

nadel bei sehr kurzem Schluss der Dauer des galvanischen Stromes proportional setzte und danach umgekehrt aus dem Ausschlag auf die Stromdauer schloss. In demselben Jahre veröffentlichte L. Breguet[1]) die Beschreibung eines anderen Chronoskops, das er mit dem russischen Artilleriecapitän Konstantinoff gemeinschaftlich entworfen. Auf einen um eine horizontale Achse sich gleichmässig drehenden Cylinder wurden nämlich mit Hülfe elektrischer Ströme zu Anfang und Ende der Bewegung metallische Stifte herabgelassen, welche die betreffenden Zeitpunkte markirten. Dem gegenüber reclamirte Wheatstone[2]) die Priorität für sich, indem er schon 1840 der Brüsseler Akademie und 1842 und 1843 auch dem Capitän Konstantinoff solche Instrumente zugesandt habe. Weil indessen die Metallstifte nicht rechtzeitig zum Fallen zu bringen waren, so hatte Wheatstone seinen ersten Gedanken schon wieder verlassen und liess nun auf dem Cylinder, der um eine schraubenförmige Achse sich drehte, von einem Schreibstift Spirallinien aufschreiben, die in den zu bestimmenden Momenten unterbrochen wurden[3]). Werner Siemens[4]) liess statt dessen, um den gleichmässigen Gang des Cylinders nicht zu gefährden, elektrische Funken auf den Cylinder überspringen. Hipp[5]) aber verbesserte im Jahre 1848 das Wheatstone'sche Chronoskop, weil doch die Bewegung des Cylinders für längere Zeit auch durch ein Uhrwerk nicht gleichmässig genug bewirkt wurde, insofern wieder bedeutend, als er durch das Uhrwerk vermittelst eines zweiten Stiftes auf dem Cylinder jede Secunde markiren liess und so die Normalzeiten, mit denen die zu messenden Zeitmomente zu vergleichen waren, auf eine Secunde beschränkte. Danach lag es wieder nahe, auf dem Cylinder neben den Marken der zu messenden Zeitpunkte noch kleinere, bekannte Zeitepochen dadurch zu verzeichnen, dass man neben diese Marken noch eine Normalstimmgabel ihre Schwingungen aufschreiben liess. Gemäss dieser Idee haben dann auch Laborde[6]), W. Beetz[7]), Joh. Müller[8]) und mit besonderem Erfolge R. König[9]) die Stimm-

[1]) Note sur un appareil destiné à mesurer la vitesse d'un projectile, Compt. rend. XX, p. 157, 1845; Pogg. Ann. LXIV, S. 459. Louis Franç. Clément Breguet, 1804 bis 1883, Enkel des berühmten Uhrmachers A. L. Breguet und Nachfolger in dessen Geschäft, Mitglied der Akademie u. d. Längenbureaus in Paris.

[2]) Compt. rend. XX, p. 1554, 1845; Pogg. Ann. LXV, S. 451.

[3]) Wheatstone führt selbst auch diesen Apparat auf eine Idee Th. Young's zurück, die derselbe in seinen Lectures on nat. phil. veröffentlicht habe.

[4]) Pogg. Ann. LXVI, S. 435, 1845.

[5]) Pogg. Ann. LXXIV, S. 589, 1848.

[6]) Cosmos XVII, p. 48 und 156, 1860.

[7]) Pogg. Ann. CXXXV, S. 128, 1868.

[8]) Pogg. Ann. CXXXVI, S. 151, 1869.

[9]) König's akustische Apparate waren auf den Weltausstellungen in London 1862 und Paris 1867 ausgestellt und erregten da viel Aufsehen; sie sind in seinem Catalogue des appareilles d'acoustique, Paris 1865, beschrieben. Siehe auch „Die neueren Apparate der Akustik" von Fr. Jos. Pisko, Wien 1865.

gabelphonographen direct als Chronoskope eingerichtet. Während man dabei zuerst die messende Stimmgabel einfach mit dem Bogen anstrich, gebrauchte Beetz den Helmholtz'schen Elektromagnetenapparat, um dieselbe in dauernden, gleichmässigen Schwingungen zu erhalten, und R. König verwandte ausser dieser Einrichtung bei einfacheren Apparaten auch wohl eine zweite Stimmgabel, welche, wieder direct angestrichen, die Normalgabel, mit der sie im Einklange stand, in gleichmässiger Bewegung hielt. Die Fixirung der bestimmten Zeitmomente bewirkte man meist wie früher durch elektrische Funken oder durch fallende Spitzen.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Auch der schon erwähnte, von Scott construirte Membranphonograph[1]), oder der Phonautograph, wie Scott selbst ihn nannte, wurde in der letzten Periode von bedeutender Wichtigkeit, weniger wohl durch sich selbst, als durch die Apparate, die aus ihm hervorgingen. Der Phonautograph bestand aus einem ellipsoidischen, aus Gyps geformten Hohlgefäss, in dessen einem Brennpunkte der tönende Körper stand und in dessen anderem Brennpunkte die die Luftschwingungen aufnehmende Membran angebracht war. Ein an der Membran aussen befestigter kleiner Stift schrieb die Schwingungen derselben auf den rotirenden Cylinder. König verbesserte diesen Phonautograph nur dadurch, dass er das Auffangegefäss parabolisch gestaltete und aus Zink formte, wandte aber das Auffangen der Schallwellen durch Membranen in neuer, sehr interessanter Weise bei der Construction seiner bekannten Flammenzeiger an. Er brachte die Gasflämmchen, die manometrischen Flammen, wie König selbst sie nennt, deren Zuleitungsgefäss an einer Seite durch die Membran geschlossen war, auf welche die Schallschwingungen geleitet wurden, zuerst an den Knotenstellen tönender Orgelpfeifen an, um die wechselnden Verdünnungen und Verdichtungen in diesen sichtbar zu machen[2]), setzte sie dann aber auch mit dem Auffangegefäss des Phonautographen in Verbindung, um so alle Schallschwingungen durch die Flammen untersuchen zu können[3]). Die rotirenden Spiegel, welche König zur Beobachtung der Flammenschwingungen benutzte, sind in ihrem Ursprunge jedenfalls auf Wheatstone[4]) zurückzuführen, der schon 1834, bei Gelegenheit seiner Messung der Geschwindigkeit der Elektricität, die Bewegungen von Flammen durch solche Spiegel optisch analysirte; später gebrauchte Tyndall[5]) zu demselben Zwecke auch schon ein dreiseitiges Prisma mit spiegelnden Seitenflächen, das an einem Faden hing und durch dessen Torsion sich um seine Achse drehte. Die König'schen Flammenzeiger erschienen zuerst den Phonautographen gegenüber mehr als interessante

---

[1]) Cosmos XIV, p. 314, 1859.

[2]) Cosmos XXI, p. 147, 1862; Pogg. Ann. CXXII, S. 242.

[3]) Akustischer Katalog von 1865; vergl. Pisko, Die neueren Apparate, S. 197 u. f.

[4]) Phil. Trans. 1834, p. 583.

[5]) Phil. Mag. (4) XIII, p. 473.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

physikalische Schaustücke, denn als wissenschaftliche Messinstrumente, wurden aber sehr bald zur Untersuchung der Vocalklänge mit vielem Erfolg verwendet, wenn sie sich auch dabei nicht von vollkommener Sicherheit zeigten. v. Zahn[1]) fand bei seiner schon erwähnten Untersuchung, dass die Flammenbilder für die Analyse höherer Vocale wenig zu leisten vermochten, meinte aber, dass eine photographische Fixirung derselben, welche eine quantitative Messung in aller Ruhe gestatte, den Fehler heben werde. Auerbach[2]) gebrauchte neben der Untersuchung der Vocale durch die Flammen noch zwei andere Methoden und konnte danach die Vortheile derselben wohl übersehen. Die Beobachtung durch die König'schen Flammen hielt er zuerst der Objectivität und der detaillirten Genauigkeit ihrer Bilder wegen für die vortheilhafteste; die Resultate zeigten aber, dass die Veränderlichkeit des Gasdruckes, die Rotation des Spiegels und hauptsächlich das eigenthümliche Verhalten der die Schwingungen übertragenden Membranen ziemlich störend einwirkten. Auerbach überzog dann die eigentlich zum Einsetzen in das Ohr bestimmten Oeffnungen von Resonatoren mit Seifenhäutchen und beobachtete deren Schwingungen mehr nach der alten Lissajous'schen Methode durch Lichtreflexe[3]). Schliesslich musste doch die gewöhnliche subjective Analyse der Klänge durch das Ohr mit Hülfe von Resonatoren als die relativ sicherste anerkannt werden. Grassmann[4]) aber machte schliesslich noch darauf aufmerksam, dass selbst die Resonatoren das ursprüngliche Intensitätsverhältniss der Töne verändern, und wies alle künstlichen Mittel für die Analyse der Vocalklänge zurück.

Directer noch als die Flammenzeiger hingen mit dem Phonautographen jedenfalls der Phonograph Edison's und das Telephon zusammen, welche Instrumente freilich alle auch direct von der Einrichtung unseres Gehörorgans hätten abgeleitet werden können und vielleicht im letzten Grunde auch abgeleitet worden sind. Auf das Telephon werden wir später wieder zurückkommen; von dem Edison'schen Phonographen wollen wir nur bemerken, dass derselbe am 22. December 1877 im Scientific American XXXVII, p. 384 zuerst beschrieben und (zum ersten Male auf dem Continent) am 11. März 1878 der Pariser Akademie

---

[1]) Jahrb. d. Erfindungen VII, S. 93, 1871.

[2]) Pogg. Ann., Ergbd. VIII, S. 177.

[3]) Die Transversalschwingungen von flüssigen Lamellen hatte um dieselbe Zeit Fr. Melde untersucht und dafür das Gesetz aufgestellt: Bei gleichflächigen Membranen, deren Umfang ein reguläres Vieleck bildet, fallen die Schwingungszahlen um so kleiner aus, je grösser die Seitenanzahl des Vielecks wird. Aus einer kleinen Anzahl von Versuchen schien auch zu folgen, dass die Schwingungszeiten bei verschiedenartigen Lösungen wie die Quadratwurzeln aus den Oberflächenspannungen sich verhalten. (Pogg. Ann. CLIX, S. 275, 1876; in seiner Akustik, Leipzig 1883, S. 131, wo Melde das Thema wieder berührt, erwähnt er indessen das zweite Gesetz nicht.) — Fr. E. Melde, geb. am 11. März 1832, Professor der Physik in Marburg i. H.

[4]) Wiedem. Ann. I, S. 606, 1877.

vorgeführt wurde. Trotzdem derselbe nichts weiter war als ein Scott'scher Phonautograph, der auch zu umgekehrter Benutzung eingerichtet worden, hatte es doch noch eines Zeitraumes von 20 Jahren und eines Erfindergenies ersten Ranges bedurft, bis dieser Gedanke erfasst und damit auch durchgeführt worden war.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Durch die Apparate, bei denen die Luftschwingungen auf Membranen und umgekehrt übertragen werden, kam der alte Streit über die Schwingungen elastischer Platten zu einem ziemlichen Abschluss. Savart [1]) hatte behauptet, dass eine Membran alle beliebigen Töne, die über ihrem Eigentone liegen, annehmen könne, und hatte von dieser Ansicht aus die Functionen des Trommelfells beim Hören erklärt. Poisson [2]), wie Lamé [3]) aber waren theoretisch und J. Bourguet und F. Bernard [4]) auch experimentell zu abweichenden Ergebnissen gekommen, und auch R. Radau [5]) hatte sich 1862 wieder für die Ansicht ausgesprochen, dass elastische Platten nur einzelne, ihnen nach Grösse, Masse etc. eigenthümliche Grund- und deren Obertöne angeben könnten. Die obigen Apparate liessen nun doch wieder sicher erkennen, dass die Membranen unter bestimmten Bedingungen alle Töne wiederzugeben vermögen, wenn sie auch die Klänge und Tongemische nicht ganz unverändert lassen. Dieser Ansicht entsprechend zeigte A. Elsas [6]) direct, dass durch geeignete Einwirkung jeder elastische Körper zu jeder Art von Schwingungen gezwungen werden kann und dass nur je nach der Entfernung des erzwungenen Tones von dem Eigentone des Körpers die Einwirkung stärker oder schwächer sein muss und die Intensität des erzwungenen Tones selbst kleiner oder grösser wird.

Noch in anderer, freierer Weise als bei den König'schen manometrischen Flammen zeigten sich die Gasflammen für Luftschwingungen empfindlich. Graf Schaffgotsch [7]) entdeckte im Jahre 1857 an der räthselhaften chemischen Harmonika neue, wunderbare Eigenschaften und steigerte dadurch das allgemeine Interesse an dieser Erscheinung zu bedeutender Höhe. Er bemerkte nämlich, dass die Flamme einer chemischen Harmonika, wenn in ihrer Nähe ein musikalischer Ton erregt wird, der mit dem Harmonikaton (nahezu) im Einklange steht oder um eine Octave höher ist, in lebhafte Erregung, starke Bewegung auf- und abwärts geräth und, wenn der äussere Ton stark genug wird, wohl auch ganz erlischt. War der Harmonikaton ein hoher, so konnte er

[1]) Ann. de chim. et de phys. (2) XXXII, p. 384, 1826.

[2]) Mém. de l'acad. VIII, p. 510, 1829.

[3]) Leçons s. l'élasticité, p. 131, 1852.

[4]) Ann. de chim. et de phys. (3) LX, p. 449, 1860.

[5]) Cosmos XX, p. 658 und XXI, p. 533, 1862.

[6]) Wiedem. Ann. XIX, S. 174, 1883. — A. Elsas, geb. am 22. März 1855, Docent in Marburg.

[7]) Pogg. Ann. C, S. 352, 1857; CI, S. 471, 1857. — Franz Gotth. Jos. Joh. C. Graf Schaffgotsch, 11. Mai 1816 Prag — 29. Nov. 1864 Berlin.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

durch eine kräftige Falsetstimme auf eine Entfernung von 10 bis 12 Schritten zum Schweigen gebracht werden, und denselben Erfolg konnte man auch durch Händeklatschen und andere Geräusche erreichen; ein kräftiger Orgelton aber wirkte sogar bis in eine Entfernung von 44 m anregend oder verlöschend auf die Flamme [1]. Tyndall stellte darauf durch Versuche mit einer Sirene den Einfluss der Tonhöhe des äusseren Tones und des Eigentones der Flamme fest [2]. Wurde der Ton der Sirene allmälig von der Tiefe aus dem Eigentone der Flamme genähert, so begann diese zu hüpfen, die Intervalle der Bewegungen nahmen zu, bis sie beim Einklange verschwanden, dann, mit dem weiteren Steigen des Tones, wurden sie wieder schneller und schneller, bis sie schliesslich abermals unmerkbar wurden. Die Bewegungen der Flamme zeigten sich also als der genaue optische Ausdruck der akustischen Stösse der beiden Töne. Die Flamme tönte in einer gewissen Höhe der Röhre am leichtesten; wenn sie in einige Entfernung unter oder über diesen günstigen Ort gebracht wurde, so konnte sie nach Belieben zum Singen oder zum Schweigen gebracht werden, ohne dass sie erlosch. Zehn Jahre später untersuchte Tyndall [3], auf eine Beobachtung seines Assistenten Barett [4] hin, neue, mit den singenden Flammen unleugbar zusammenhängende Erscheinungen, die der sensitiven Flammen. Strömt nämlich das brennende Gas unter so hohem Druck aus, dass die Flamme dem Flackern nahe ist, so verändert dieselbe ihre Form, verlängert oder verkürzt sich, geräth in heftige Zuckungen oder erlischt auch ganz, sobald ein geeigneter Ton in ihrer Nähe erklingt. Diese letzteren Vorgänge können als Resonanzerscheinungen aufgefasst werden, und H. Planeth [5] zeigte dem entsprechend, dass die Lichtflammen die Töne von Stimmgabeln ganz wie Resonatoren zu verstärken vermögen.

Damit ist aber die Fähigkeit der Lichtflammen, selbst in Schwingungen zu gerathen, noch nicht erklärt, und eine allgemeine Theorie der Flammen-

---

[1] Diese letzteren Versuche wurden in der grossen Michaeliskirche in Hamburg angestellt; eine kräftige Männerstimme wirkte beim Einklange noch in der Entfernung von 36 m auf die Flamme.

[2] Phil. Mag. (4) XIII, p. 473, 1857.

[3] Phil. Mag. (4) XXXIII, p. 92 und 375, 1867: On sounding and sensitive flames und On the action of sounding vibrations on gazeous and liquid jets. Die letztere Abhandlung bezieht sich auf die Beobachtung, dass auch ausfliessende Wasser- und Gasstrahlen in ihrer Constitution durch Töne verändert werden.

[4] W. E. Barett bemerkte auch, dass man das Schreien eines Säuglings durch eine sensitive Flamme mit Hülfe eines elektrischen Läutewerkes nach entfernten Orten signalisiren lassen könnte. Der Einfluss der Töne auf Gasflammen war wohl vielfach früher schon bemerkt worden; jedenfalls hatte Le Conte im Jahre 1858 auf das Pulsiren einer sogenannten Fischschwanzflamme bei den hörbaren Stössen musikalischer Töne aufmerksam gemacht (Silliman's Journ. (2) XXV, p. 62), worauf auch Tyndall in der oben angegebenen Arbeit Bezug nimmt.

[5] Pogg. Ann. CXLIV, S. 639, 1871.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

schwingungen steht in der That noch aus, oder doch wenigstens die allgemeine Anerkennung einer solchen. Die ältere, durch Faraday's Autorität gefestigte Hypothese von dem intermittirenden Brennen der singenden Flammen schien auch noch im Jahre 1866 [1]) durch Beobachtung einer Schichtung dieser Flammen bestätigt zu werden. Doch leiteten schon 1858 Grailich und Weiss [2]) jedenfalls ungezwungener das Singen ohne ein periodisches Auslöschen der Flamme aus den bei der Verbrennung entstehenden Volumenveränderungen, dem Zuströmen des Sauerstoffs, dem Abfliessen der Verbrennungsproducte und dem Aufsteigen der erwärmten Luft in der Brennerröhre ab. Für das letztere Moment sprachen in sehr kräftiger Weise die Experimente P. L. Rijke's [3]), der ohne jede Flamme in einer Röhre nur dadurch das Tönen hervorrief, dass er mittelst des galvanischen Stromes ein Drahtnetz in derselben zum Glühen brachte. Sondhauss schloss im Jahre 1860 [4]) aus seinen Versuchen, dass die Luftsäule noch im Ausflussrohre in Schwingungen geräth; er erinnerte an die Töne, welche beim Ausfliessen von Wasser entstehen [5]), und verglich den dabei stattfindenden Vorgang mit der Entstehung der Töne in den Zungenpfeifen. J. B. Zoch [6]) versuchte die Faraday'sche Ansicht wenigstens theilweise zu retten, indem er angab, dass die Flamme doch in ihrem oberen Theile immer verlösche und von Neuem angezündet werde. A. Terquem [7]) führte das Tönen auf die Wechselwirkung zwischen der Flamme und dem durch diese erzeugten aufsteigenden Luftstrom zurück; der letztere verändert die Form der Flamme und diese wirkt danach wieder auf den Luftstrom zurück, so dass das ganze System in regelmässige Schwingungen geräth. Bresina [8]) endlich erklärte, dass der in die Röhre eindringende Luftstrom unter der Flamme eine Verzögerung erleidet und dass dadurch über dieser Stelle eine Verdichtung entsteht, die, nach beiden Seiten sich ausgleichend, die Schwingungen erzeugt. Mögen indessen auch manche von diesen Ursachen oder auch alle auf das Tönen der Flammen modificirend einwirken, so lassen doch neue Arbeiten über verwandte Erscheinungen sicherer als früher ver-

[1]) Pogg. Ann. CXXVIII, S. 347, 1866.

[2]) Sitzungsber. d. Wien. Akad. XXIX, S. 271. — W. J. Grailich, 1829 bis 1859, Privatdocent in Wien. — E. Weiss, geb. am 26. Aug. 1837, Prof. a. d. Universität Wien.

[3]) Pogg. Ann. CVII, S. 339, 1859. — Pieter Leonh. Rijke, geb. am 11. Juli 1812, Prof. a. d. Universität Leyden.

[4]) Pogg. Ann. CIX, S. 1 und 426, 1860. — K. Friedr. Jul. Sondhauss, 2. Juli 1815 Breslau — 4. November 1886 Neisse, Director des Realgymnasiums daselbst.

[5]) Pogg. Ann. CXXIV, S. 1 und 235, 1865.

[6]) Ibid. CXXVII, S. 589, 1866.

[7]) Ibid. CXXXIV, 468, 1868.

[8]) Programm d. Archigymnasiums Soest 1880/81; Beibl. zu Wiedem. Ann. V, S. 401. — Bresina, Prorector des Archigymnasiums zu Soest.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

muthen, dass die Flammentöne in erster Linie, wie alle Töne, die durch bewegte Luftmassen entstehen, auf die Widerstände zurückzuführen sind, welche die Gase beim Vorbeiströmen an anderen Gasen oder an festen Körpern finden, und dass sie also zur Classe der Reibungstöne gezählt werden müssen. Der in die Röhre eindringende Luftstrom würde danach durch die Reibung an den Rändern und den Wänden der Röhre, sowie auch an der Flamme in innere Schwingungen gerathen, die bei passender Uebereinstimmung unter sich wie mit dem Eigentone der Röhre regelmässig tönend werden konnten. Dahin zielende Erklärungen hatten schon Tyndall und Kundt in ihren Abhandlungen aus den sechziger Jahren gegeben, und der Letztere [1]) speciell hatte gezeigt, dass auch bei freien Flammen solche Reibungstöne erzeugt werden können. Durch das zufällige Tönen breiter Gasflammen aufmerksam gemacht, beobachtete nämlich Kundt, dass zwei Windströme, die aus feinen Spitzen gegen einander strömen, leise Töne geben, wenn die Ströme nicht ganz gleich stark oder nicht genau gegen einander gerichtet sind, sondern etwas an einander vorbeiströmen, und dass zwei Gasflammen, ebenso behandelt, noch stärkere Töne erzeugen. Solche Töne entstehen aber auch, wenn man statt der einen Flamme einen Strom von atmosphärischer Luft oder von Kohlensäure anwendet, und, was das Ueberzeugendste, sie werden auch hörbar, wenn man nur die Flamme gegen eine feste Wand strömen lässt.

Die vielfachen, grosses Interesse erregenden Arbeiten über die Reibung der Gase und Flüssigkeiten unter sich wie an festen Körpern erweckten naturgemäss auch weitere Untersuchungen über die Reibungstöne überhaupt. Ueberall da, wo Gase oder Flüssigkeiten an festen Körpern oder auch feste Körper an Flüssigkeiten und Gasen sich hin bewegen, müssen, wie bei der Reibung von festen, elastischen Körpern an einander, Geräusche entstehen, die, wenn die Bewegung regelmässig genug ist oder wenn ein nahe liegender Körper durch seine Resonanz regelmässige Bewegungen aus dem Geräusche heraushebt, in bestimmte Töne übergehen [2]). Eine erste grössere Arbeit über solche Reibungstöne lieferte V. Strouhal im Jahre 1878 [3]). Dieser befestigte an einer senkrechten Achse über einander zwei verschiebbare, wagerechte Arme, zwischen denen die auf ihre Reibungstöne zu untersuchenden Körper (Metalldrähte oder Glasstäbe oder Glasröhren) festgespannt werden konnten, und drehte dann die Achse mit den Armen vermittelst eines Schwungrades schnell um sich selbst. Die Versuche ergaben folgende Gesetze: Die Höhe des Reibungstones ist unabhängig von der Substanz, wie von der Spannung und der Länge des erzeugenden Drahtes, dagegen der Bewegungsgeschwindigkeit des Drahtes

[1]) Pogg. Ann. CXXVIII, S. 614, 1866.

[2]) Reibungstöne sind jedenfalls auch die Töne aller Bogeninstrumente.

[3]) Wiedem. Ann. V, S. 216, 1878.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

direct und dem Durchmesser desselben umgekehrt proportional; die Intensität des Tones wächst mit der Länge des Drahtes. Bewegt man dünne elastische Drähte allmälig schneller, so schwillt die Intensität der Töne mehrere Male zu bedeutenden Maximalwerthen an, und zwar geschieht dies jedesmal, wenn der Reibungston einem Eigentone des Drahtes (Grundton oder Oberton) entspricht; der Draht wird also bei genügender Stärke der Einwirkung auch zu Eigenschwingungen gebracht, wenn nur die Reibungsschwingungen der Luft den Eigenschwingungen des Drahtes entsprechen. Die Thatsache aber, dass der Reibungston bei Vermehrung der Rotationsgeschwindigkeit dem noch nachklingenden Drahttone an Höhe vorauseilt, ist ein weiteres Zeichen für die unabhängige Existenz der Reibungstöne. Leicht folgt aus diesen Darlegungen, dass die Töne der Aeolsharfe ebenfalls Reibungstöne oder durch Reibung erzeugte Drahttöne sind, auch die Töne der Labialpfeifen führt Strouhal auf die Reibung des Luftstromes an dem Labium zurück. Der Theorie Strouhal's schliesst sich Melde in seiner Akustik vom Jahre 1883 an [1]), der auch die Abhängigkeit der Töne der Lippenpfeifen von den Reibungstönen durch weitere Versuche erläutert. Indem derselbe den Druck und dadurch die Geschwindigkeit, mit welcher die Luft in die Pfeife einströmt, vielfach variirte, kam er zu dem Gesetz: Jeder Oberton einer Orgelpfeife kann erklingen, so oft er Oberton zu dem Reibungston des Anblaseluftstromes wird; die Tonstärke eines Pfeifentones aber steigt um so mehr, je mehr dieser Ton ein Ton stärkster Resonanz, d. h. unisono mit dem Reibungstone ist [2]). Auch die Töne des Brummkreisels leitet Melde aus Reibungstönen ab, die an der Oeffnung des Kreisels entstehen und durch die Resonanz des Hohlraumes verstärkt werden [3]).

An den Lippenpfeifen sind aber jedenfalls zweierlei Reibungstöne zu unterscheiden: solche, die den Strouhal'schen Reibungstönen entsprechend am Labium und solche, die an den Rändern der Luftspalte erzeugt werden. Die letzteren hat W. Kohlrausch im Jahre 1881 [4]) zum Gegenstande eingehender Untersuchungen gemacht. Er kommt dabei zu Resultaten, die denen von Strouhal ganz entsprechen, und hält danach für erwiesen, dass die Spalttöne, wie die Strouhal'schen Töne durch die Reibung der bewegten Luftmassen an den betreffenden festen Körpern oder auch an den Luftmassen, die den festen Körpern anhaften,

---

[1]) Akustik, Leipzig 1883, S. 72 u. 249. Melde will dabei aber den Namen Reibungstöne nicht ganz in seinem eigentlichen Sinne nehmen. Er sagt in seiner Akustik, S. 72, über die Entstehung der Strouhal'schen Töne: „Sicherlich werden hierbei Verdünnungen und Verdichtungen der Luftmasse, insbesondere in Verbindung mit eigenthümlichen Wirbelbewegungen, anzunehmen sein. Wenn man also den Namen Reibungstöne gebraucht, so muss man daran denken, dass dieser Name zunächst nicht das Wesen und das eigenthümliche Zustandekommen der Tonbildung erklärt."

[2]) Akustik, Leipzig 1883, S. 254.

[3]) Ibid., S. 255.

[4]) Wiedem. Ann. XIII, S. 545, 1881.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

zu erklären sind. Auch die noch nicht genügend wissenschaftlich beobachteten, halb glockenhaften, halb saitenartig streichenden Töne, welche Reisende in einsamen Gegenden gehört haben wollen, ohne dass sie irgend eine sichtbare Tonquelle entdecken konnten, hat E. Sorel[1]) auf Reibungstöne, die durch Vorüberstreichen der Luft an einer Felsecke, einem Bergkamme u. s. w. entstehen und durch ein Thal als Resonator verstärkt werden, zurückgeführt.

Die Akustik hat bis auf die Neuzeit eine isolirte Stellung in der Physik eingenommen, und weniger als jede andere Disciplin derselben war sie bei dem allgemeinen Reigen der Kräftetransformationen in Betracht gezogen worden. Nun aber, wo man immer vielseitigere Umsetzungen von mechanischen Bewegungen in Schallschwingungen beobachtete, wurde man auch auf die Umwandlung der letzteren in andere physikalische Bewegungen aufmerksam. E. Warburg[2]) betonte, dass beim Tönen fester Körper immer ein Theil der Schallenergie sich in Wärme verwandelt, und zwar um so mehr, je rascher die Töne der Körper verklingen. Solche Erwärmungen zeigten sich vor Allem bei den Longitudinal-, dann aber auch bei den Transversalschwingungen fester Körper, dagegen war bei gut getrockneten Gasen (Luft, Kohlensäure, Leuchtgas) keine Wärmeentwickelung zu bemerken. Champion und Pellet[3]) fanden im Jahre 1872, dass unter günstigen Umständen der Schall chemische Kräfte auslösen und dass z. B. Jodstickstoff durch gewisse hohe Töne zum Explodiren gebracht werden kann. Arthur Christiani bewies 1882[4]), dass Resonatoren im besonderen Falle den Schall tonlos zu absorbiren vermögen, und die directe Transformation von Schallbewegungen in Elektricität wurde durch das Bell'sche Telephon sogar von besonderer Wichtigkeit.

Danach drängte sich der Gedanke an die Messung der Schallenergie, an die Bestimmung des Abhängigkeitsverhältnisses der Schallintensität von den Kräften, welche die Töne erzeugen, von selbst auf, und die Begründung einer Sonometrie wurde zum Bedürfniss. Zur Beurtheilung der Intensität verschiedener Töne ist aber das Ohr noch weniger geeignet, als das Auge es für die Schätzung der Lichtintensität ist; die Construction von Sonometern hat darum nicht bloss länger auf sich warten lassen, sondern ist auch bis heute noch viel weniger gelungen, als die der Photometer. Physiologen hatten sich zwar mehrfach mit der Bestimmung der Empfindlichkeit des Ohres gegen Differenzen von Schallintensitäten beschäftigt, dabei aber die Intensität des Schalles nicht sowohl gemessen, als vielmehr nach der zu seiner Erzeugung aufgewandten lebendigen

---

[1]) La Nature 1883, p. 206.

[2]) Pogg. Ann. CXXXVII, S. 632, 1869.

[3]) Klein's Revue 1875, S. 435.

[4]) Ibid. 1884, S. 196.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Kraft geschätzt [1]). Ein Instrument zur objectiven Vergleichung von Schallintensitäten versuchte Alfred M. Mayer [2]) zu construiren, indem er von den betreffenden, in zwei getrennten Zimmern befindlichen Schallquellen den Schall durch gleich abgestimmte Resonatoren aufnahm und durch gleich lange Röhren zusammen in die Manometerkapsel eines König'schen Flammenzeigers leitete. Die Ruhe der Manometerflamme zeigte dann die Gleichheit der von den Resonatoren aufgenommenen Schallintensitäten an, und aus den Entfernungen der Resonatoren von den Schallquellen liess sich dann nach dem Gesetze der quadratischen Abnahme des Schalls mit der Entfernung auch das Verhältniss der Intensitäten der Schallquellen selbst berechnen [3]). V. Dvořák [4]) machte 1877 darauf aufmerksam, dass man mit seinen Apparaten zur Constatirung der akustischen Anziehungen und Abstossungen auch die Energie der Schallbewegung und damit die Intensität des Schalls messen könnte. A. Oberbeck [5]) endlich erinnerte an eine Aeusserung W. Weber's [6]) vom Jahre 1846, wonach die Intensität von Schallschwingungen wohl durch die Inductionsströme zu messen sei, die sie unter geeigneten Umständen zu erzeugen vermöchten. Er konnte diesen Wink auch insofern benutzen, als er in einen galvanischen Stromkreis ein Mikrophon und ein Galvanometer einschaltete und die beobachteten Bewegungen der Galvanometernadel in gewissen Grenzen den auf das Mikrophon einwirkenden Schallstärken proportional setzte, wobei sich leider nur das Mikrophon nicht für alle verschiedenartigen Schalle gleich empfänglich zeigte. Oberbeck gebrauchte sein Instrument vor Allem dazu, den Theil der einem tönenden Körper zugeführten Energie zu bestimmen, welcher sich wirklich in Schallbewegung umsetzt. Für die Schallintensitäten, welche durch das Fallen von Blei- oder Steinkugeln auf Holzplatten erzeugt werden, nahm er die empirische Formel $J = p \cdot h^{\varepsilon}$ als gültig an, wo $p$ das Gewicht des fallenden Körpers, $h$ die Fallhöhen und $\varepsilon$ eine Constante bezeichnen. Durch Beobachtung des Verhältnisses der Schallintensitäten beim Fallen eines Körpers aus verschiedenen Höhen erhielt er dann aus dieser Formel für $\varepsilon$ Werthe, die zwischen 0,629 und 0,656 schwankten. Vierordt [7]) hatte früher, indem er für verschiedene Kugeln die Fallhöhen bestimmte,

---

[1]) Die Untersuchungen wurden hauptsächlich durch das Fechner'sche psychophysische Grundgesetz angeregt.

[2]) Phil. Mag. (4) XLV, p. 90, 1873. — Alfr. M. Mayer, Prof. am Stevens-Institut in Hoboken, Nordamerika.

[3]) Nach Vierordt (Zeitschr. f. Biologie XVIII, S. 383; Jahrb. d. Erf. XIX, S. 140) sind die Abweichungen von diesem Gesetze sehr bedeutend, und die Schwächung des Schalls bei seiner Ausbreitung ist nahezu der Entfernung selbst proportional.

[4]) Wiedem. Ann. III, S. 328, 1877.

[5]) Ibid. XIII, S. 222, 1881. — A. Oberbeck, geb. am 25. März 1846, Prof. der Physik in Greifswald.

[6]) Elektrodyn. Maassbest. I, S. 297.

[7]) Zeitschr. f. Biologie XIV, S. 300, 1873.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

bei denen nach subjectiver Schätzung die Schallintensitäten gleich werden, Ergebnisse bekommen, aus denen nach jener Formel für $\varepsilon$ der Werth 0,622 folgen würde. Oberbeck meint, dass die Zuverlässigkeit des Mikrophons als Sonometer erst durch weitere Arbeiten festgestellt werden könnte, betont aber, dass die Empfindlichkeit desselben alle bisher benutzten Vorrichtungen zur Untersuchung des Schalls jedenfalls weit übertrifft.

In beunruhigender Weise wurde die Theorie der Fortpflanzung des Schalls in den Gasen von der neuen kinetischen Theorie der Gase beeinflusst. Kaum war man im Anfange der sechziger Jahre über die Richtigkeit der Laplace'schen Correction der Newton'schen Formel endgültig einig geworden, so wurden alle die gewohnten Deductionen durch die mechanische Gastheorie wieder in Frage gestellt. Früher hatte man sich die Fortpflanzung des Schalls als ein Fortschreiten der Bewegung in einem ruhenden Mittel vorgestellt, jetzt sollten die Schwingungen von Theilen zu Theilen übertragen werden, die alle schon eine bedeutende eigene Geschwindigkeit besassen; als Schwingungsbewegungen waren danach die Bewegungen der einzelnen Molecüle in einem schallleitenden Gase nicht mehr aufzufassen. Doch war es immerhin nicht schwer, einzusehen, dass in dem innerlich bewegten Mittel Verdichtungen und Verdünnungen wie in einem ruhenden fortschreiten müssen. Wenn eine Ebene z. B. in einem Gase schwingt, so wird sie in ihrer Vorwärtsbewegung die auftreffenden Molecüle mit einer grösseren Geschwindigkeit zurückwerfen, als dieselben beim Auftreffen hatten. Diese grössere Geschwindigkeit werden die Molecüle bei den Zusammenstössen auf andere übertragen, und die Uebertragung wie die durch die grössere Geschwindigkeit entstandene Verdichtung wird durch das ganze Gas fortschreiten. Ganz in derselben Weise wird das dann auch mit der bei dem Rückwärtsschwingen der Ebene entstehenden Verdünnung geschehen, und die Fortpflanzungen des Schalls in einem Gase nach der alten oder der neuen Theorie werden sich nur darin unterscheiden, dass die erstere als Uebertragung einer Geschwindigkeit selbst, die letztere nur als die Uebertragung einer Geschwindigkeitsdifferenz gedacht ist. Nur eine bedeutende Schwierigkeit bleibt dabei. Da die Uebertragung der Geschwindigkeitsdifferenzen durch die Bewegung der Gasatome geschieht, so sollte man meinen, dass die Geschwindigkeit dieser Uebertragung und damit die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls der Moleculargeschwindigkeit des betreffenden Gases gleich sein müsse, was aber bekanntlich nicht der Fall ist. J. Stefan, der zuerst über die Schallleitung nach der neueren Gastheorie schrieb, hob auch sogleich im Jahre 1863 [1]) dieses Bedenken. Es scheint, so sagt er, bisher nicht bemerkt worden zu sein, dass aus der neuen Theorie der

[1]) Pogg. Ann. CXVIII, S. 494, 1863.

Gase unter Voraussetzung einer regelmässigen Anordnung der Molecüle, wie sie Krönig gebraucht hat, für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls die Newton'sche Formel erhalten werden kann. Nach der neuen Theorie der Gase muss die Geschwindigkeit des Schalls von der Geschwindigkeit der progressiven Bewegung der Molecüle abhängen, und die beiden Geschwindigkeiten würden nahezu gleich sein, wenn die Geschwindigkeiten der Molecüle alle in derselben Richtung lägen, in welcher die Fortpflanzung des Schalls stattfindet [1]). Denken wir uns aber wie Krönig den Raum in Würfel zertheilt, in deren jedem sich nur drei Molecüle parallel den Seiten des Würfels bewegen, und denken wir ferner denselben Raum in Schichten durch Ebenen zerlegt, die auf den Diagonalachsen jener Würfel senkrecht stehen, so wird eine Bewegung von Schicht zu Schicht nur mit der Geschwindigkeit $x = \frac{u}{\sqrt{3}}$ fortschreiten, wenn $u$ die progressive Geschwindigkeit der Molecüle bedeutet. Bezeichnen wir noch weiter die Masse eines Molecüls mit $m$, ein bestimmtes Volumen mit $v$, die Anzahl der Molecüle in demselben mit $n$ und den herrschenden Druck mit $p$, so ist nach Krönig und Clausius $pv = \frac{mnu^2}{3}$. Hieraus aber folgt, wenn wir $\frac{mn}{v}$, d. h. die Dichte des Gases mit $\varrho$ bezeichnen, direct die Newton'sche Formel $x = \sqrt{\frac{p}{\varrho}}$. Diese Ableitung der Schallfortpflanzung nach der neueren Gastheorie, die lange unverändert geblieben, konnte indessen nicht mehr genügen, nachdem Clausius, Maxwell, O. E. Meyer u. A. die Einfachheit der Krönig'schen Voraussetzungen aufgegeben und sogar eine Ungleichheit der Moleculargeschwindigkeiten in demselben Gase angenommen hatten. J. L. Hoorweg [2]) bemühte sich deshalb, auf den ganz allgemeinen Grundlagen der kinetischen Gastheorie die Ableitung der Schallgeschwindigkeit aufzubauen, führte aber auch, abweichend von Stefan, die Verminderung der Schallgeschwindigkeit gegenüber der Moleculargeschwindigkeit vor Allem auf den Zeitverlust zurück, den die Molecüle in ihren Bewegungen bei den Zusammenstössen erleiden. Tolver Preston [3]) dagegen ging in seiner Bestimmung der Schallgeschwindigkeit nach der kinetischen Gastheorie wieder auf die von Stefan angegebene Ursache der Geschwindigkeitsverminderung zurück. Das Verhältniss der Schallgeschwindigkeit zur Moleculargeschwindigkeit wurde danach um so interessanter, als sich dasselbe für alle Gase, wenigstens für solche von gleicher molecularer Zusammensetzung [4]),

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

---

[1]) Pogg. Ann. CXVIII, S. 494.

[2]) Archives néerlandaises XI, p. 131, 1876; unter Mitwirkung des Verfassers gegebenes Referat in Beibl. zu Wiedem. Ann. I, S. 209.

[3]) Phil. Mag. (5) III, p. 441, 1877.

[4]) Nimmt man die Molecüle nicht als starr an, so wird die Schallleitung auch durch intramoleculare Bewegungen beeinflusst werden und bei

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

als eine nahezu constante Grösse darstellen musste und als diese Grösse sowohl zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit aus der Moleculargeschwindigkeit wie auch umgekehrt dienen konnte. Nach Stefan ist der Werth dieses Verhältnisses $\frac{x}{u} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0{,}577$, Hoorweg gab für dasselbe 0,649, und Maxwell berechnete auf Veranlassung von Preston's Arbeit dafür die Zahl 0,745. Diese Zahlen hätten sehr wohl zur Prüfung der betreffenden Theorien dienen können, wenn nur die Geschwindigkeiten der Molecüle und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls selbst sicherer bekannt gewesen wären.

Die Bestimmungen der Geschwindigkeiten des Schalls hatten während der letzten Jahrhunderte man kann wohl sagen niemals geruht, und doch konnte man zu einer hinreichend genauen und genügend sicheren Zahl niemals gelangen. Regnault stellte im Jahre 1868 [1]) wieder eine grosse Reihe von Messungen der Schallgeschwindigkeit an, die jedenfalls sehr genaue Werthe, aber auch Resultate lieferte, die man nicht ohne Weiteres annehmen mochte. Regnault benutzte bei diesen Versuchen lange Leitungen von Gas- und Wasserröhren; in die vordere Mündung derselben wurde ein Pistol abgefeuert, die andere Mündung war durch eine Kautschukmembran geschlossen, welche durch ihre Schwingungen das Ankommen der erregten Schallwellen signalisirte. Bei vielen Versuchen schloss man gleich nach dem Abfeuern des Pistols auch die vordere Mündung durch eine Kautschukmembran, und dann konnte oft eine zehnmalige Reflexion der Schallwelle beobachtet werden. Die Zeiten, welche der Schall bei dem Durchlaufen der Röhren rückwärts und vorwärts gebrauchte, wurden von einem König'schen Stimmgabel-Chronographen registrirt. Die Versuche ergaben das erwartete Resultat, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit nicht abhängt vom Druck und bei verschiedenen Gasen mit der Wurzel aus der Dichte sich ändert, brachten dabei aber auch das überraschende Ergebniss, dass diese Geschwindigkeit mit der Intensität des Schalls sich vergrössert. Für die mittlere Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls in trockener Luft von $0^0$, gerechnet von dem Momente des Abfeuerns des Pistols bis zu dem, wo die Intensität des Schalls so weit geschwächt ist, dass sie die empfindlichste Membran nicht mehr zu bewegen vermag, erhielt Regnault die Zahl 330,6 m. Zwei Versuchsreihen in freier Luft, bei denen der Schall durch Kanonenschüsse erzeugt wurde, ergaben für die Schallgeschwindigkeit in trockener Luft von $0^0$ bei Entfernungen von 1280 m und 5445 m bezüglich die Werthe 331,37 und 330,7 m, worin Regnault

---

Molecülen von verschiedener Anzahl der Atome auch in verschiedener Weise stattfinden müssen.

[1]) Mém. sur la vitesse de propagation des ondes dans les milieux gazeux, Mém. de l'Inst. XXXVII, p. 3—575, 1868.

ebenfalls eine Bestätigung der Abnahme der Schallgeschwindigkeit mit der Abnahme der Intensität sah [1]). Mit diesen Versuchen und ihrer bedeutenden Abweichung von den bis jetzt für sicher gehaltenen Messungen, die meist 332 m in guter Uebereinstimmung ergaben, war die Frage nach der Grösse der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls vollständig wieder aufgethan [2]).

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

A. Kundt, der im Jahre 1866 [3]) eine neue Art von Staubfiguren entdeckt und dieselben zur Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls angewandt hatte, benutzte nun diese indirecte Methode abermals, um die Ergebnisse Regnault's zu prüfen [4]). Wenn man die Luft in Glasröhren, welche an einem Ende durch verschiebbare Kolben verschlossen sind, in gehörig starke Schwingungen versetzt, so bilden sich in denselben durch Reflexion stehende Wellen, welche leichte Pulver, die in die Wellenröhre eingestreut sind, zu regelmässigen Staubringen oder Staubstreifen ordnen. Diese Staublinien zeigen die Knotenlinien der stehenden Schwingungen an und erlauben also eine genaue Messung der Wellenlänge, aus der man bekanntermaassen nach Bestimmung der Tonhöhe oder Schwingungsanzahl der erzeugenden Schwingungen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls leicht berechnen kann. Indem dann Kundt einen Apparat construirte, der die Füllung der Wellenröhre mit verschiedenen Gasen gestattete und dabei eine Uebertragung der Schwingungen der Luft auf das Wellenrohr nicht zu Stande kommen liess, gelangte er mittelst dieses Apparates zu folgenden Sätzen: 1) Die Schallgeschwindigkeit der Luft in Röhren nimmt mit dem Durchmesser des Rohres ab und beginnt sich merklich von der Geschwindigkeit in der freien Luft zu unterscheiden, wenn der Durchmesser kleiner wird als ein Viertel der Wellenlänge des benutzten Tones; 2) das Rauhmachen der Röhrenwände verringert in engen Röhren eben-

---

[1]) Regnault beobachtete das Ankommen der Schallwellen immer durch die Bewegung leichter Membranen; vielleicht darf man annehmen, dass Schalle von stärkerer Intensität sich bei dieser Einrichtung schneller signalisiren, als solche von geringerer Intensität, und darf statt einer langsameren Fortpflanzung des schwächeren Schalles eine langsamere Registrirung desselben vermuthen. Dabei bleibt immer möglich, dass stärkere Erschütterungen der Luft, die sehr starke Verdichtungen derselben erzeugen, sich schneller fortpflanzen, als ganz regelmässig gewordene Luftwellen. S. Earnshaw war schon 1858 zu solchen Ergebnissen gekommen, und auch Mach beobachtete 1877 (Wien. Ber. LXXV, S. 101) solche grössere Geschwindigkeiten der Explosionswellen.

[2]) Le Roux stellt (Ann. de chim. et de phys. (4) XII, p. 354) folgende Resultate für die Schallgeschwindigkeiten zusammen:

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1738 Pariser Akademie . . | 332,00 m | 1822 Bureau de Longitude | 330,64 m |
| 1811 Benzenberg . . . . . | 337,70 „<br>332,33 „ | 1822 Moll und Van Beek . | 332,25 „ |
| | | 1822 Stampfer u. Myrbach | 332,44 „ |
| 1821 Goldingham . . . . | 331,10 „ | 1844 Bravais u. Martins . | 332,44 „ |

[3]) Pogg. Ann. CXXVII, S. 497, 1866.

[4]) Ibid. CXXXV, S. 337 u. 527, 1868.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

falls die Geschwindigkeit; 3) ein Einfluss der Intensität des Tones kann nicht nachgewiesen werden, ebensowenig ein Einfluss der Art der Tonerregung, wenn man von der Geschwindigkeit der ersten Welle absieht; 4) die Schallgeschwindigkeit in weiten Röhren ist unabhängig von dem Druck, in engen tritt bei vermehrtem Druck eine Vergrösserung der Schallgeschwindigkeit ein; 5) alle beobachteten Veränderungen der Geschwindigkeit rühren von der Reibung und besonders von dem Wärmeaustausch an den Wänden der Röhre her; die Schallgeschwindigkeit bei $100^0$ ist gleich $v_0 \sqrt{1 + 100\alpha}$, wenn $v_0$ die Geschwindigkeit bei $0^0$ und $\alpha$ den Ausdehnungscoëfficienten der Luft bezeichnen. Diese Ergebnisse Kundt's stimmten auch da, wo sie von Regnault's Resultaten abwichen, recht gut mit den Folgerungen, welche Kirchhoff um diese Zeit theoretisch ableitete [1]). Nur in den Angaben über den Einfluss der Röhrenweite zeigten sich unleugbare Differenzen zwischen der Theorie und dem Experimente, die aber Kundt theilweise aus Beobachtungsfehlern, theilweise aus einem Einflusse des angewandten Pulvers auf die Bewegung in den Röhren erklärte.

Bei den Bestimmungen der Schallgeschwindigkeit in freier Luft störte die ungleiche Beschaffenheit der Atmosphäre, bei den indirecten Messungen derselben in Röhren störte der Einfluss der Röhren die Genauigkeit des Resultates. Das erzeugte das Bedürfniss, die Schallgeschwindigkeit auf kleineren Strecken in möglichst abgeschlossenem Raume zu messen. Eine Methode hierzu, die der Schallcoincidenzen, hatte J. Bosscha [2]) schon im Jahre 1854 angegeben. Schaltet man in einen galvanischen Stromkreis zwei elektromagnetische Glocken so ein, dass ihre Schläge, wenn sie dicht nebeneinander gestellt sind, genau gleichzeitig erfolgen, und entfernt sich dann mit der einen Glocke von der anderen, so wird man die Schläge der Glocken nur dann wieder gleichzeitig hören, wenn der Schall die Entfernung der beiden Glocken gerade in der Zwischenzeit zweier oder mehrerer Schläge durchläuft. Danach ist dann die Strecke, um welche der Schall in einer bestimmten Zeit fortschreitet, und damit die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls überhaupt, in einem grösseren Zimmer leicht zu messen. Einen Apparat zur praktischen Verwerthung dieser Methode, der indessen zu einer ganz genauen Messung doch noch nicht brauchbar war, construirte

---

[1]) Pogg. Ann. CXXXIV, S. 177, 1868; auch Gesammelte Abhandlungen, Leipzig 1882, S. 540. Kirchhoff giebt die Formel: Geschw. in der Röhre = Geschw. i. d. freien Raume $\times \left(1 - \frac{\gamma}{2r\sqrt{\pi n}}\right)$, wo $\gamma$ eine Constante ist, die von der Reibung und dem Wärmeaustausch abhängt. Ganz dieselbe Formel, in der nur die Constante $\gamma$ eine andere Bedeutung erhalten, hatte auch schon Helmholtz im Jahre 1863 entwickelt. (Verhandl. d. naturhist.-med. Vereins zu Heidelberg III, S. 16, 1863; Wissenschaftl. Abhandl. I, S. 381.)

[2]) Pogg. Ann. XCII, S. 485, 1854.

R. König im Jahre 1862[1]), Akos Szathmari aber erhielt endlich im Jahre 1877[2]) nach einem wieder etwas veränderten Verfahren für die Schallgeschwindigkeit in trockener Luft bei 0° den Werth 331,57 m.

Physik der Tonempfindungen, Mechanik der Schallbewegungen, c. 1860 bis c. 1880.

Merkwürdige Beobachtungen über eine ganz ungleiche, nach den verschiedenen Richtungen hin ganz verschiedene Ausbreitung des Schalls veröffentlichte Tyndall im Jahre 1874[3]). Er fand, dass die akustische Durchlässigkeit von der optischen gänzlich unabhängig ist, und schrieb danach die akustische Undurchlässigkeit vor Allem dem in der Luft enthaltenen Wassergas oder vielmehr der Mischung des Wassergases mit der Luft zu. Osborne Reynolds[4]) indessen kam um dieselbe Zeit zu dem Resultat, dass auch der Nebel den Schall dämpft, und erklärte das durch die Reibung der schwingenden Lufttheilchen an den schwerer beweglichen und darum relativ ruhenden Wassertheilchen. Henry und Duane[5]) zogen aus ihren Versuchen den Schluss, dass vor Allem die Temperaturdifferenzen und die dadurch hervorgerufenen Luftströmungen und Dichtigkeitsveränderungen es seien, die die Ausbreitung des Schalls verhinderten. Damit übereinstimmend suchte dann auch W. W. Jacques[6]) die Ursache der schlechten akustischen Verhältnisse so mancher grossen Auditorien nicht in deren blossen Raumverhältnissen, sondern vielmehr in den ungünstigen Luftströmungen, die daselbst durch besondere Temperaturverhältnisse erzeugt werden, und belegte diese Ansicht auch durch interessante Experimente.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Nach zwei Richtungen hin entwickelte sich die **Elektricität** während des letzten Zeitraumes in sehr überraschender Weise. Von ganz kleinen Anfängen ausgehend, zuerst nur einige seltsame, ganz ausserhalb des Rahmens der übrigen physikalischen Kräfte stehende Erscheinungen umfassend, hatte sich dieselbe nicht bloss den übrigen physikalischen Potenzen immer mehr genähert, sondern war sogar zur umwandlungsfähigsten und damit zur Hauptstütze der Idee von der Einheit aller Naturkräfte geworden. Dies führte nun in der Gegenwart einerseits zu dem Versuche, theoretisch den Weg zurück zu verfolgen und die Elektricität auf denselben Urgrund mit allen anderen physikalischen Kräften zurückzuführen, und erweckte andererseits das Bestreben, auch für die Technik alle nothwendigen Kräfteumwandlungen und Kräfteübertragungen durch die

[1]) Compt. rend. LV, p. 603, 1862; Pogg. Ann. CXVIII, S. 610, 1863.

[2]) Wiedem. Ann. II, S. 418, 1877.

[3]) Pogg. Ann., Jubelbd., S. 668, 1874. Tyndall sagt da (S. 681): „Es ist nicht Regen, nicht Hagel, nicht Dunst, nicht Nebel, nicht Schnee, überhaupt nicht das Wasser unter irgend einer festen oder flüssigen Form, sondern gasförmiges Wasser gemischt mit Luft, wodurch letztere akustisch trübe und wolkig wird."

[4]) Nature XII, p. 375, 1875.

[5]) Silliman's Journ. (3) XI, p. 34, 1876.

[6]) Phil. Mag. (5) VII, p. 111, 1879.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Elektricität zu vollziehen. Nach beiden Seiten hin freilich ist der Process noch keinesfalls vollendet. Weder kann man sagen, dass das Substrat und die Wirkungsweise der elektrischen Kräfte dem Substrat und der Wirkungsweise der übrigen physikalischen Potenzen als ganz entsprechend nachgewiesen seien, noch weniger darf man behaupten, dass die Elektricität in der Technik die angedeutete Vermittlerrolle schon wirklich durchführe, aber nach beiden Richtungen hin ist das Ziel gesetzt, und die Möglichkeit einer endlichen Erreichung wird kaum mehr bestritten.

Was die Speculationen über die Wirkungsweise der elektrischen Kräfte betrifft, so mussten sich dieselben natürlich an das allgemeinste und fundamentalste Gesetz dieser Wirkungen, das Weber'sche, anschliessen oder wenigstens mit demselben auseinandersetzen. Wie wir schon im vorigen Abschnitte bemerkt, hatte man seiner Zeit jede speculative Opposition gegen dasselbe unterlassen und nur die Uebereinstimmung seiner Ableitungen in Bezug auf die galvanische Induction mit den anderweitig entwickelten Theorien dieser Erscheinung geprüft, wobei die Ergebnisse der Untersuchung dem Weber'schen Gesetze jedenfalls nicht ungünstig waren. Auf ähnlichem Wege vorgehend, kam jetzt aber Helmholtz zu anderen Resultaten und regte damit eine erneute allgemeine Discussion des ganzen Gesetzes an.

Helmholtz [1]) wurde um das Jahr 1870, wie er erzählt, durch gewisse Versuche zur Discussion der Frage veranlasst, in welcher Weise elektrische Ströme im Inneren eines körperlich ausgedehnten Leiters zu fliessen beginnen, und suchte Aufschluss darüber aus der Theorie zu gewinnen. Die Bewegungsgleichungen der elektrischen Ströme von veränderlicher Intensität für Leiter von drei Dimensionen, welche sich aus Weber's Gesetz der elektrischen Fernwirkungen ergeben, waren im Jahre 1857 [2]) von Kirchhoff entwickelt und theils von ihm, theils von anderen Mathematikern mit Erfolg zur Erklärung einiger Beobachtungsthatsachen benutzt worden. Bei dem Versuche von Helmholtz aber, sie auf eine neue Aufgabe anzuwenden, ergaben sich physikalisch unzulässige Folgerungen, und der Letztere überzeugte sich, dass der Grund davon in den Principien der Theorie stecke, dass nämlich nach den Folgerungen aus der Weber'schen Theorie das Gleichgewicht der ruhenden Elektricität in einem leitenden Körper labil sein könne und dass deshalb die darauf gegründete Theorie die Möglichkeit von elektrischen Strömungen anzeige, die zu immer grösser, ja unendlich werdenden Werthen der Strömungsintensität und der elektrischen

---

[1]) Journ. f. reine und angew. Math. LXXII, S. 57, 1870; wissenschaftliche Abhandlungen I. S. 545: „Ueber die Bewegungsgleichungen der Elektricität für ruhende leitende Körper."

[2]) Pogg. Ann. CII, S. 529, 1857.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Dichtigkeit fortschreiten. Bewegungsgleichungen dagegen, die Helmholtz auf Grund des Neumann'schen Inductionsgesetzes aufstellte, ergaben für die ruhende Elektricität stabiles Gleichgewicht und führten also nicht zu den angedeuteten unmöglichen Folgerungen. Um zwischen den bestehenden Theorien der Induction, der von Weber, der von Neumann und der von J. Cl. Maxwell zu entscheiden, entwickelte Helmholtz einen allgemeinen Ausdruck für das Potential zweier Stromelemente, der alle bisher aufgestellten Gesetze einschloss. Derselbe enthielt eine Constante $k$ von unbestimmtem Werthe, der gleich 1 oder gleich 0 oder gleich — 1 werden musste, wenn der allgemeine Potentialausdruck in den von Neumann oder von Maxwell oder von Weber gebrauchten übergehen sollte. Eine weitere Untersuchung der elektrischen Bewegungen ergab dann, dass ein negativer Werth der Constante $k$ auch einen negativen Werth der durch die elektrische Bewegung repräsentirten Arbeit, d. h. einen Werth kleiner als im Ruhezustande, möglich macht und dass somit wirklich das Weber'sche Gesetz, nicht aber die anderen beiden Theorien ein labiles Gleichgewicht im Ruhezustande zulassen. Helmholtz giebt danach zu [1]), dass das Weber'sche Gesetz sich allerdings dem Gesetze von der Erhaltung der Kraft insofern einfügt, als es keinen Kreisprocess zulässt, der Arbeit aus Nichts erzeugt, hält aber dafür, dass das erstere dem letzteren insofern widerspricht, als nach ihm zwei elektrische Theilchen, die mit endlicher Geschwindigkeit ihre Bewegung beginnen, in endlicher Entfernung von einander eine unendliche lebendige Kraft erreichen und also eine unendlich grosse Arbeit leisten können. Gegen den letzteren Vorwurf vertheidigte sich W. Weber im Jahre 1871 [2]) durch die Bemerkung, dass derselbe nur zutreffend werden könne, wenn man den elektrischen Massen eine Anfangsgeschwindigkeit viel grösser als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes beilege und noch dazu annehme, dass die elektrischen Massen sich bis auf moleculare, d. h. unendlich kleine Entfernungen einander nähern könnten. Helmholtz [3]) aber beharrte auf seiner Ansicht, dass die von ihm angedeuteten Verhältnisse nach dem Weber'schen Gesetze auch schon unter praktisch möglichen Umständen eintreten könnten. Aus diesem Gegensatze entspann sich dann eine längere, eifrige Debatte, an der sich noch manche Gelehrte, wie C. Neumann, Zöllner, J. Bertrand, Riecke u. A., meist auf Weber's Seite stehend, betheiligten, die auch manche werthvolle, klärende Arbeiten

[1]) In seiner Abhandlung über die Erhaltung der Kraft hatte Helmholtz angenommen, dass bloss die Kräfte unter das Gesetz von der Erhaltung der Kraft fallen, die nur von den Entfernungen, nicht von den Geschwindigkeiten der Massen abhängen. Siehe S. 364.

[2]) Abhandl. d. K. Sächs. Gesellsch. d. Wissensch. X, S. 170, 1871.

[3]) Journ. für reine und angew. Math. LXXV, S. 35, 1873; wissenschaftl. Abhandl. I, S. 647.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

hervorrief, die aber doch auf physiko-mathematischem Gebiete zu keinem Ende kommen konnte.

Auch auf experimentellem Gebiete schien damals eine Entscheidung zwischen den entgegenstehenden Theorien kaum möglich. Helmholtz selbst bemerkte, dass das Weber'sche Gesetz für Kreisprocesse keine Abweichungen ergäbe und dass für geschlossene Ströme überhaupt alle die drei erwähnten Inductionsgesetze in gleicher Weise den Thatsachen entsprächen. Bei ungeschlossenen Strömen oder Stromenden aber stellten sich der Untersuchung bis dahin unüberwindliche Schwierigkeiten entgegen, die besonders durch die Dauer der Ströme bedingt waren, eine Dauer, die nur so lange währt, bis die zur Ladung der Oberfläche des betreffenden Leiters nöthige Elektricitätsmenge herbeigeführt ist [1]. Endlich erschien es Helmholtz möglich, Stromenden von genügender Wirksamkeit mit Hülfe der elektrischen Convection zu erhalten, unter welch letzterem Ausdrucke er die Fortführung der Elektricität mittelst der Fortbewegung elektrisch geladener Körper versteht. Das (Neumann-Helmholtz'sche) Potentialgesetz schreibt nämlich elektrodynamische Wirkungen nur der in ponderablen Trägern sich bewegenden, nicht aber der convectiv fortgeführten Elektricität zu, während das Weber'sche Gesetz darin keinen Unterschied macht. Versuche aber, die N. Schiller 1874 [2] im physikalischen Laboratorium der Universität Berlin und später mit vervollkommneten Apparaten in Moskau zu jenem Zwecke ausführte, ergaben das mindestens negative Resultat, dass entweder die vom Potentialgesetze angezeigten Wirkungen der Stromenden nicht existiren, oder dass ausser den von diesem Gesetze angezeigten elektrodynamischen Wirkungen auch noch solche der convectiv fortgeführten Elektricität bestehen, dass das Potentialgesetz also jedenfalls unvollständig ist, wenn man in ihm nur Rücksicht nimmt auf Fernwirkungen der in den Leitern fortströmenden Elektricitäten [3]. Bald darauf folgende Untersuchungen, die Henry A. Rowland [4] ebenfalls im physikalischen Laboratorium zu Berlin unternahm, erbrachten dann auch den directen Beweis, dass die Bewegung elektrisirter ponderabler Körper wirklich elektromagnetisch wirksam ist. Helmholtz erkannte danach an, dass die Resultate der Versuche den Voraussetzungen der Theorie von Weber allerdings ganz entsprechen, machte aber dabei doch darauf aufmerksam, dass dieselben sich ebenso aus der Theorie von Maxwell, die jede unvermittelte Fernwirkung verneint, wie auch aus dem Potentialgesesetz ableiten lassen, wenn bei

[1] Pogg. Ann. CLVIII, S. 91.

[2] Ibid., S. 93; Wissenschaftl. Abh. I, S. 780. Siehe a. Pogg. Ann. CLIV, S. 456 und 537; CLX, S. 333.

[3] Pogg. Ann. CLVIII, S. 95.

[4] Ibid., S. 487. Wissensch. Abh. I, S. 791. — H. A. Rowland, Prof. d. Physik an der John Hopkin's University in Baltimore.

letzterem nur die dielektrische Polarisation der die Leiter umgebenden Isolatoren berücksichtigt wird[1]).

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Blieb danach auch die quantitative Wahrheit des Weber'schen Gesetzes unangetastet, so deutete doch schon die letztere Aeusserung darauf hin, dass es sich nun nicht mehr so sehr um die Richtigkeit seiner Folgerungen, als um die Zulässigkeit seiner Voraussetzungen handelte und dass man nun die unvermittelte Wirkung der elektrischen Kräfte in die Ferne wie das gleichzeitige Strömen zweier entgegengesetzter Flüssigkeiten in einem Drahte seiner Möglichkeit und Nothwendigkeit nach allgemeiner zu bekämpfen anfing. C. Neumann versuchte 1871[2]) wenigstens die Annahme der gleichzeitigen Existenz zweier entgegengesetzter Ströme in einem Drahte zu umgehen. Unter Beibehaltung des Weber'schen Grundgesetzes der elektrischen Kräfte leitete er die Gesetze der elektrodynamischen Wirkungen, wie die der Induction aus der Annahme ab, dass nur die eine der beiden Elektricitäten, die positive, sich bewege, während die andere, die negative, mit der ponderablen Masse fest verbunden bleibe. Auch Clausius tadelte die Annahme Weber's, dass bei einem galvanischen Strome in jedem Leiterelemente gleiche Mengen positiver und negativer Elektricität sich mit gleichen Geschwindigkeiten nach entgegengesetzten Seiten bewegen sollen. „So lange nicht", sagt er, „zwingende Gründe für die Annahme einer solchen Doppelbewegung vorliegen, darf man die einfachere Vorstellung, dass ein Strom aus der Bewegung nur eines Fluidums bestehe, nicht aufgeben, sondern muss versuchen, aus ihr die Wirkung des galvanischen Stromes zu erklären" [3]). Da ihm aber das Weber'sche Gesetz mit dieser einfacheren Vorstellung nicht vereinbar erschien[4]), so ging er selbst dazu über, ein neues Grundgesetz für die elektrodynamische Wirkung zweier bewegten Elektricitätstheilchen aufzustellen[5]). Dabei sah er sich gezwungen, die andere Weber'sche Annahme, dass die Anziehungs- oder Abstossungskräfte zweier elektrischen Elemente in die Verbindungslinie derselben fallen müssen, ebenfalls noch aufzugeben. Für die Gravitation zweier ruhenden ponderablen Molecüle fand er eine dem entsprechende Annahme natürlich, da hier keine andere ausgezeichnete Richtung als die Verbindungslinie der Molecüle existirt; bei derjenigen Kraft dagegen, welche zwei Elektricitätstheilchen bei ihren Bewegungen

[1]) Pogg. Ann. CLVIII, S. 493.

[2]) Berichte der K. Sächs. Gesellsch. d. Wissensch. XXIII, math.-naturw. Classe, S. 386, 1871.

[3]) Die mechanische Behandlung der Elektricität, Braunschweig 1879, S. 228.

[4]) Ibid. S. 232.

[5]) Journal für reine u. angew. Math. LXXXII, S. 85, 1876; die mechanische Behandlung der Elektricität, Braunschweig 1879, S. 225.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

auf einander ausüben, verhält es sich damit ganz anders. In diesem Falle giebt es in der That ausser der Verbindungslinie der Theilchen noch andere ausgezeichnete Richtungen, namentlich die beiden Bewegungsrichtungen der Theilchen, und es ist sehr wohl denkbar, dass auch diese Richtungen einen Einfluss auf die Kraftrichtung haben. Clausius behält danach von den Grundlagen der Weber'schen Theorie nur die Annahme bei, dass die Wechselwirkung zweier elektrischen Theilchen von ihrer Lage und von ihren, durch die Geschwindigkeits- und Beschleunigungscomponenten bestimmten Bewegungszuständen abhängig sei, und entwickelt mit Zuhülfenahme blosser Erfahrungsthatsachen für die elektrodynamische Wechselwirkung das neue Potential $V = k \frac{ee'}{r} v v' \cos \varepsilon$, oder allgemein für das Potential zweier elektrischer Massen $e$ und $e'$ auf einander $V = \frac{ee'}{r} (1 + k v v' \cos \varepsilon)$, wo nun aber $v$ und $v'$ nicht mehr relative, sondern vielmehr die absoluten Geschwindigkeiten der Elektricitätstheilchen (und $\varepsilon$ den Winkel zwischen den Bewegungsrichtungen derselben) bezeichnen [1]). Doch sind auch dem Gesetz von Clausius Einwände nicht erspart geblieben, und wirkliche Anhänger hat es nur wenige gefunden. Weber selbst wollte dasselbe nur in so weit anerkennen, als es mit dem seinen zusammenfiele. H. Lorberg [2]) aber hielt wohl mit Recht die aus Clausius' Formel hervorgehende Abhängigkeit der Wirkungen von den absoluten Geschwindigkeiten der Elektricitäten für durchaus unannehmbar und nur die Abhängigkeit von der relativen Geschwindigkeit für möglich. „A priori", sagt er, „kann man die Annahme, dass nicht bloss die relative, sondern auch die absolute Bewegung zweier Elektricitätstheilchen, etwa gegen den umgebenden Aether, eine Kraft zwischen ihnen hervorrufen könnte, allerdings nicht verwerfen; allein jedenfalls würde dann diese Kraft nur scheinbar von den Elektricitätstheilchen selbst ausgehen, und das Gesetz hätte, indem es von den dabei eigentlich wirksamen äusseren Kräften keine Rechenschaft gäbe, etwas Unbefriedigendes [3])." Er versucht dann eine Ableitung ohne eine bestimmte Annahme über die Bewegung der Elektricität im Strome und kommt dabei wieder zu dem Resultate, dass die ponderomotorische wie

---

[1]) Die mechanische Behandlung der Elektricität, S. 277. Natürlich kann auch hier nicht von der absoluten Geschwindigkeit im strengsten Sinne die Rede sein. Clausius hat ausdrücklich (Wiedem. Ann. X, S. 616, 1880) darauf aufmerksam gemacht, dass er sich bei dem Gebrauch des Wortes absolut das Medium, in dem sich die elektrischen Theilchen bewegen, als ruhend gedacht hat und dass er unter der absoluten Geschwindigkeit natürlich nur die Geschwindigkeit der Elektricitätstheilchen relativ gegen das Medium versteht.

[2]) Pogg. Ann. Ergänzungsb. VIII, S. 599, 1877.

[3]) Ibid. S. 599 bis 600.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

die elektromotorische Kraft zweier Stromelemente ganz dem Weber'schen Grundgesetz entspreche und dass danach auch die entgegengesetzte Bewegung zweier Elektricitäten im Strome angenommen werden müsse[1]). Clausius erklärt die Untersuchungen Lorberg's für die Klarstellung des Gegenstandes als werthvoll, hält aber trotzdem sein Gesetz aufrecht und charakterisirt nun die Sachlage folgendermaassen[2]): „Wenn man von der Voraussetzung ausgeht, dass nur die relative Bewegung im Weber'schen Sinne des Wortes auf die elektrodynamischen Kräfte Einfluss haben könne, so gelangt man zu dem Schlusse, dass das Weber'sche Grundgesetz das einzig mögliche sei und dass in einem galvanischen Strome beide Elektricitäten mit entgegengesetzt gleicher Geschwindigkeit fliessen müssen. Wenn man die Annahme, dass in den galvanischen Strömen und den sonstigen elektrischen Strömen, für welche die elektrodynamischen Gesetze gelten, beide Elektricitäten mit entgegengesetzt gleicher Geschwindigkeit fliessen, nicht machen will, so darf man auch nicht annehmen, dass nur die relative Bewegung (sei es im Weber'schen oder im gewöhnlichen Sinne des Wortes) auf die elektrodynamischen Kräfte Einfluss habe, sondern muss auch den absoluten Bewegungen einen Einfluss zuschreiben, und gelangt dann zu meinem Grundgesetze als dem einzig möglichen[3])."

---

[1]) Pogg. Ann. Ergänzungsb. VIII, S. 607, 1877.

[2]) Die mechanische Behandlung der Elektricität, Braunschweig 1879, S. 352.

[3]) Nach Wilh. Gintl's (1804 bis 1883, Director des österreichischen Telegraphenwesens) Versuchen eines telegraphischen Gegensprechens, auf der Strecke Wien-Prag im Juli 1853, die allerdings noch nicht vollendet ausfielen, nahm man vielfach an, dass schon durch die Möglichkeit solcher Versuche die Möglichkeit gleichzeitiger, entgegengesetzter elektrischer Strömungen in einem Drahte constatirt werde. Werner Siemens aber bemerkte sogleich (Pogg. Ann. XCVIII, S. 121, 1856), dass bei dieser Vorstellung das Ohm'sche Gesetz, wie die Lehre von den Stromverzweigungen ausser Acht gelassen werde, und machte darauf aufmerksam, dass zwei in entgegengesetzter Richtung in einen Leiterkreis eingeschaltete, gleiche Batterien unthätig bleiben, wie daraus hervorgeht, dass in dem Stromkreis weder Wärme erzeugt wird, noch in den Batterien chemische Thätigkeit stattfindet. — Eine merkwürdig scharfe Kritik des Weber'schen Gesetzes geben Thomson und Tait ohne jede Begründung in ihrem Handbuch der theoretischen Physik, Braunschweig 1871, I, S. 350: „Er (Weber) nimmt an, dass ein elektrischer Strom aus der Bewegung von Theilchen zweier Elektricitätsarten besteht, die den Leitungsdraht in entgegengesetzten Richtungen durchlaufen, und dass diese Theilchen, wenn sie in relativer Bewegung sind, auf andere solche Elektricitätstheilchen Kräfte ausüben, die von denjenigen verschieden sind, welche sie im Zustande relativer Ruhe ausüben würden. Diese Annahme ist bei dem jetzigen Zustande der Wissenschaft auf keine Weise zu rechtfertigen, da wir uns die Hypothese, es existiren zwei elektrische Fluida, unmöglich als richtig denken können, und da die Schlüsse

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Damit wäre man wirklich zwischen Scylla und Charybdis festgehalten, wenn man nicht den auch von Lorberg angedeuteten Ausweg benutzen und eine Mitwirkung des umgebenden Mediums bei der Einwirkung zweier Elektricitätstheilchen auf einander annehmen dürfte. Das aber führt in seinen letzten Consequenzen auf den auch von Helmholtz schon mit seiner Berücksichtigung der dielektrischen Polarisation angedeuteten Weg, nämlich zur Aufgabe der actio in distans, wenigstens auf elektrischem Gebiete, und zur Annahme einer Vermittelung der elektrischen Wirkungen durch das Dielectricum. Bevor wir jedoch die hierher gehörigen an Faraday's Ansichten sich anschliessenden Arbeiten näher besprechen, müssen wir erst noch einem Mittelwege nachgehen. Wenn die Kraftwirkung eine durch das Medium vermittelte ist, so muss sie zu ihrer Ausbreitung Zeit gebrauchen. Es fragt sich nun, ob es bei der Bestimmung der Kraftwirkung möglich ist, diese Zeit ihrer Ausbreitung mit in Rechnung zu ziehen, ohne sich weiter um das vermittelnde, in seinem Wesen und seinen Bewegungen uns unbekannte Medium selbst zu bekümmern. Der erste, welcher in dieser Weise eine Fortpflanzungszeit der elektrischen Kräfte mit in Betracht zog, scheint Gauss gewesen zu sein. Schon im Jahre 1845 [1]) hatte dieser in einem Briefe an W. Weber mitgetheilt, dass er sich mit elektrodynamischen Speculationen bereits seit längerer Zeit beschäftige und auch seine Untersuchungen veröffentlicht haben würde, wenn er den wahren Schlussstein der Elektrodynamik, nämlich die Ableitung der Zusatzkräfte (die zu der gegenseitigen Wirkung ruhender Elektricitätstheile noch hinzukommen, wenn sie in gegenseitiger Bewegung sind) und der nicht instantanen, sondern (auf ähnliche Weise wie beim Licht) in der Zeit sich fortpflanzenden Wirkungen derselben hätte einfügen können. Er sprach da auch die feste Ueberzeugung aus, dass es vor allen Dingen darauf ankommen würde, sich eine bestimmte Vorstellung von der Art, wie die Verbreitung der Wirkungen vor sich geht, zu bilden. B. Riemann hatte dann im Jahre 1858 der Göttinger gelehrten Gesellschaft eine Abhandlung überreicht, die, weil er sie selbst zurückzog, erst nach seinem Tode im Jahre 1867 veröffentlicht wurde [2]). Darin bestimmte er das elektrische Potential $V$ zweier elektrischer Theilchen

ausserdem im Widerspruch mit der „Erhaltung der Energie" stehen, die wir aus unzähligen experimentellen Gründen als ein allgemeines Naturgesetz ansehen. Solche Theorien sind um so gefährlicher (?), wenn sie zufällig weitere Erscheinungen erklären, wie Weber's Theorie die inducirten Ströme erklärt." Tait hatte auch schon in seinem Sketch of Thermodynamics, Edinburgh 1868, in ähnlicher Weise sich ausgesprochen.

[1]) Gauss' sämmtliche Werke, V, S. 627. Der Brief ist vom 19. März 1845 datirt und also im Jahre vor der Veröffentlichung des Weber'schen Gesetzes geschrieben.

[2]) Pogg. Ann. CXXXI, S. 237, 1867.

auf einander durch eine der Laplace-Poisson'schen Gleichung nachgebildete Formel

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - \alpha^2 \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}\right) + \alpha^2 . 4 \pi \varrho = 0,$$

wo $\alpha$ eine bestimmte Geschwindigkeit (nämlich $\alpha^2 = \frac{1}{2} c^2$, wenn $c$ die erwähnte Weber'sche Constante) bezeichnet. Riemann vermied Aussprüche über das Medium, in dem sich die Wirkung fortpflanzen sollte, aber nach der Gleichung muss diese Fortpflanzung mit der von Wellen und anderen Störungen in elastischen Medien übereinstimmen, denn das obige Potential $V$ ist nicht mehr allein von der elektrischen Dichte $\varrho$, sondern auch von der Zeit und damit von der Bewegung abhängig, und die Constante $\alpha$ ist der Geschwindigkeit des Lichtes im Aether nahezu gleich [1]). Auch C. Neumann ging im Jahre 1868 [2]) bei seiner Vertheidigung und neuen Ableitung des Weber'schen Gesetzes von der Vorstellung der zeitlichen Fortpflanzung der elektrischen Wirkungen von Partikel zu Partikel aus. Er unterschied deutlich von dem elektrostatischen Potential $\frac{e e_1}{r}$ als dem emissiven, das elektrodynamische

$$\frac{e e_1}{r} \left[1 + \frac{1}{c^2}\left(\frac{d r}{d t}\right)^2\right]$$

oder das receptive, welches letztere er aus der Vorstellung ableitete, dass das emissive Potential sich zwar unverändert zwischen den Körpern fortpflanzt, aber zu dieser Fortpflanzung Zeit gebraucht, so dass es bewegte Körper in anderer Grösse trifft, als es durch die momentane Entfernung der elektrischen Theilchen bedingt ist.

Ganz dieselbe Vorstellung wandte Edlund direct auf die Wirkung zweier Elektricitätstheilchen in ungemein geistreicher und fruchtbarer Weise bei seiner Arbeit „über die Natur der Elektricität“ vom Jahre 1871 [3]) an, ohne Neumann dabei zu nennen und jedenfalls also

---

[1]) Riemann sagt über diese Beziehungen (S. 237): „Der Königl. Gesellschaft erlaube ich mir eine Bemerkung mitzutheilen, welche die Theorie der Elektricität und des Magnetismus mit der des Lichtes und der strahlenden Wärme in einen nahen Zusammenhang bringt. Ich habe gefunden, dass die elektrodynamischen Wirkungen galvanischer Ströme sich erklären lassen, wenn man annimmt, dass die Wirkung einer elektrischen Masse auf die übrigen nicht momentan geschieht, sondern sich mit einer constanten (der Lichtgeschwindigkeit innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler gleichen) Geschwindigkeit zu ihnen fortpflanzt.“ — Georg Friedr. Bernh. Riemann, 17. September 1826 Breselenz bei Dannenberg — 20. Juli 1866 Selasca a. Lago Maggiore, Prof. der Mathem. in Göttingen.

[2]) Die Principien der Elektrodynamik, Tübingen 1868; Auszug von Scheibner in der Zeitschrift für Math. u. Phys. XIII. Literaturzeitung S. 37, 1868.

[3]) Pogg. Ann. Ergänzungsband VI, S. 95 und 241, 1874; übersetzt aus Archiv des scienc. de la Bibliothèque univ., Mars et Avril 1872; der Stockholmer

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

auch ohne dessen Arbeit zu kennen. Von allen ehemals anerkannten Imponderabilien sind nach Edlund die beiden elektrischen Fluida noch die einzigen, die bis jetzt unter dem theoretischen Gesichtspunkt als nothwendig betrachtet werden. Er will nun versuchen zu zeigen, dass sich die elektrischen Erscheinungen, die statischen, wie die dynamischen, mit Hülfe eines einzigen Fluidums erklären lassen, welches aller Wahrscheinlichkeit nach nichts anderes als der Aether ist. Zu dem Zwecke nimmt er das Dasein einer zarten, im höchsten Grade elastischen Materie an, die im ganzen Weltall verbreitet ist, und zwar nicht bloss im Vacuum, sondern auch in den Theilen des von der wägbaren Substanz eingenommenen Raumes und setzt voraus, dass die in bestimmten Entfernungen von einander befindlichen Molecüle dieser Substanz einander längs ihrer Verbindungslinie im umgekehrten Verhältniss der Quadrate dieser Entfernungen abstossen. Der elektrische Aether gleicht demnach im höchsten Grade einem gewöhnlichen Gase. Für die Beziehungen des Aethers zu der übrigen Materie ist dann nur noch die eine Annahme nöthig, dass in den Körpern, welche wir gute Elektricitätsleiter nennen, der in ihnen enthaltene Aether oder wenigstens ein Theil desselben sich leicht von einem Punkt zum anderen verschiebt, während er bei einem materiellen Nichtleiter der Elektricität in einem grösseren oder geringeren Grade an den ponderablen Molecülen haftet. Ist dabei der nicht leitende materielle Körper ein Gas oder eine Flüssigkeit von vollkommener Liquidität, so bewahren sich die Aethertheilchen immer noch einen Theil ihrer Beweglichkeit insofern, als sie sich dann mit den Theilchen des Gases oder der Flüssigkeit leicht bewegen. Aus der Beweglichkeit der Aetheratome folgt nothwendig, dass der Druck im Aether, wie in Flüssigkeiten und Gasen, überall und nach allen Richtungen hin gleich sein muss. Man kann daher mit den nöthigen Modificationen auf den Aether das Archimedische Princip anwenden, dass jeder in eine Flüssigkeit getauchte Körper so viel an Gewicht verliert, als das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit beträgt, wobei man natürlich hier nicht an die Schwere, sondern nur an die Abstossung der Aethermolecüle denken darf.

Ein materieller Körper kann sich durch den Effect einer elektrischen Action nicht bewegen, wenn der in ihm enthaltene Aether von allen Seiten gleich stark abgestossen wird. Ist aber die Abstossung von der einen Seite geringer als von der anderen, so muss der Körper, wenn er frei ist, sich nach der durch die Repulsivkraft bestimmten Seite hin bewegen. Bei einer elektrischen Wirkung zweier Körper auf einander sind danach folgende Umstände in Betracht zu ziehen: „1) Die directe

Akademie war der Aufsatz am 10. Mai 1871 vorgelegt worden. — Erik Edlund, 14. März 1819 Nerike — 19. August 1888 Stockholm, Physiker der Akademie der Wissensch. in Stockholm.

Wirkung zwischen dem Aether von $A$ und dem von $B$; 2) die Wirkung, welche das ganze umgebende Mittel, mit Ausnahme des Aethers von $A$, auf den von $B$ ausübt; 3) die Wirkung des Aethers von $A$ auf den Aether, welcher, wenn man $B$ entfernt, sich in dem nun von $B$ eingenommenen Raume befindet; 4) die Wirkung des ganzen umgebenden Mittels, mit Ausnahme des von $A$ eingenommenen Raumes auf den Aether, welcher, im Falle man $B$ entfernt hätte, sich in dem Raume befände, den $B$ zuletzt einnimmt." Die beiden ersten Fälle beziehen sich auf den Effect der ganzen umgebenden Aethermasse auf den Aether von $B$; die beiden letzten dagegen drücken denselben Effect auf denjenigen Aether aus, welcher sich an dem jetzt von $B$ eingenommenen Raum befände, wenn man $B$ entfernt hätte. Nimmt man nun die algebraische Summe der beiden ersten Fälle und subtrahirt man davon die Summe der beiden letzten, so erhält man, conform dem Archimedischen Princip, den Ausdruck der für $B$ geschaffenen Bewegung. Mit Hülfe der Annahme, dass ein mit positiver Elektricität beladener Körper mehr Aether als im normalen Zustande enthält und dass die Aethermenge eines negativ elektrischen Körpers geringer ist als im normalen Zustand, stellt dann Edlund für die elektrostatischen Anziehungen und Abstossungen die Coulomb'schen Formeln fest, und auch die Influenzerscheinungen der statischen Elektricität folgen direct aus jenen Annahmen. Der elektrische Entladungsstrom aber ist nichts anderes als der Uebergang des Aethers aus dem einen Körper in den anderen. Der galvanische Strom besteht darin, dass der elektrische Aether sich in der Bahn des Stromes von einem Punkt zum anderen begiebt und dass die Intensität des Stromes aus dem Product der Dichtigkeit des bewegten Aethers in seine Geschwindigkeit hervorgeht, oder, anders gesagt, dass sie proportional ist der Aethermenge, die in der Zeiteinheit die Kette durchläuft. Die Aethermasse, welche sich in der geschlossenen Kette befindet, ist gleich gross, der Strom mag existiren oder nicht. Die elektromotorischen Kräfte, aus denen der Strom entspringt, können keinen Aether erschaffen; ihre Wirkung beschränkt sich darauf, die oscillatorische Bewegung, welche in Gestalt von Wärme schon existirt, in translatorische zu verwandeln. Daraus folgt, dass die Wärme verschwinden muss an dem Punkt der Kette, wo die elektromotorische Kraft sich in Thätigkeit befindet, was auch das Peltier'sche Phänomen beweist. Der Umstand, dass ein folgender Punkt des Leitungsdrahtes nicht eher Elektricität aufnehmen kann, bis alle vorhergehenden Punkte desselben Drahtes gesättigt sind, macht die Geschwindigkeit in Drähten von der Beschaffenheit derselben abhängig und ist die Ursache, dass man bis jetzt noch keinen bestimmten Zahlenwerth für die Geschwindigkeit der Elektricität in Drähten hat angeben können. Alle Versuche aber kommen darin überein, dass

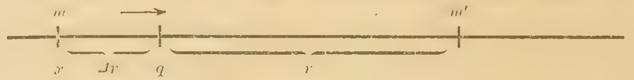
Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

diese Geschwindigkeit sehr gross und von der Intensität des Stromes unabhängig ist.

„Im Verlauf dieser Arbeit, sagt Edlund, indem er zur Elektrodynamik übergeht, werden wir uns einer Thesis bedienen, die unseres Wissens noch nicht aufgestellt worden ist als Princip bei der Erklärung von Naturerscheinungen [1]), welche aber, wie uns scheint, dabei eine axiomatische Wahrheit besitzt. Dieses Princip ist: dass Alles, was in der äusseren Natur vorgeht oder geschieht, eine gewisse Zeit erfordert. Diese Zeit kann so kurz sein, wie man will, aber niemals Null. Zeit und Raum sind die unumgänglichen Bedingungen zur Existenz der Naturerscheinungen. Dies ist eine Wahrheit a priori, bestätigt durch die Erfahrung in dem Maasse, als die wissenschaftlichen Methoden zur Messung der Zeit und des Raumes sich vervollkommnet haben . . . Die Thesis kann in Bezug auf ihre Wichtigkeit verglichen werden mit der, welche man als Basis der mechanischen Wärmetheorie ansehen und mit den Worten ausdrücken kann: „Nichts entsteht aus Nichts." Die aufgestellte These muss vor Allem ihre Anwendung im Gebiete der Elektricität finden, da die grosse Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieses Phänomens rasche Modificationen in der Wirkung hervorruft, welche die Aethermolecüle auf einander ausüben."

Mit Hülfe dieser Annahme bringt es Edlund dann fertig, und das ist der interessanteste und weittragendste Theil der ganzen Arbeit, die elektrischen Kräfte, die unmittelbar in die Ferne wirken, von dem Bewegungszustand der elektrischen Massen abhängig zu machen und so eine dem Weber'schen Grundgesetze analoge Formel zu erhalten, ohne der Vorstellung von den als actio in distans wirkenden Kräften eine andere als die vorhin angegebene Annahme beifügen zu müssen. Zwei Aethermolecüle $m$ und $m'$ üben in der Entfernung $r$, wenn sie in Ruhe sind, eine Abstossung $\frac{mm'}{r^2}$ auf einander aus. Dagegen giebt der Fall, dass $m$ sich mit einer constanten Geschwindigkeit $h$ dem $m'$ nähert, zu




anderen Verhältnissen Anlass. Wenn $m$ sich zunächst im Punkt $x$ befindet, um $r + \varDelta r$ von $m'$ entfernt, darauf sich in der Zeit $\varDelta t$ dem $m'$ um den Abstand $\varDelta r$ nähert, so nimmt die gegenseitige Abstossung von

[1]) In Rücksicht auf die ganz allgemeine Formulirung seines Princips kann man Edlund hier wohl Recht geben, in der Elektrodynamik hatte man dasselbe, wie bereits erwähnt wurde, schon längere Zeit vor Edlund gebraucht. Auch war es für die Physiker, welche eine actio in distans überhaupt nicht zugeben, selbst in seiner Allgemeinheit ganz selbstverständlich und gar nicht zu umgehen.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

$\frac{m m'}{(r + \Delta r)^2}$ bis auf $\frac{m m'}{r^2}$ zu. Allein wenn die Annäherung mit einer hinreichenden Geschwindigkeit geschieht, so hat die Abstossung nicht Zeit, dieser Zunahme zu folgen. Die Abstossung in $q$ ist geringer als die, welche dem Abstand $r$ entspricht. Die Abnahme ist, unter sonst gleichen Umständen, eine Function der constanten Geschwindigkeit. Man kann also die Abstossung im Punkt $q$ ausdrücken durch $\frac{m m'}{r^2} \cdot f(h)$, wo die Function der Geschwindigkeit $f(h)$ kleiner als 1 sein muss. Umgekehrt erhält man leicht, dass, wenn $m$ von $m'$ sich entfernt, die Abstossung gleich $\frac{m m'}{r^2} \cdot F(h)$ gesetzt werden kann, wo nun $F(h) > 1$ sein muss. Denkt man sich die Geschwindigkeit, mit der sich die Elemente einander nähern, als negativ, die umgekehrte als positiv, so kann man auch beide Formeln in die einzige $\frac{m m'}{r^2} F(h)$ zusammenziehen, wo $F(h)$ dann für positive Werthe von $h$ grösser und für negative Werthe kleiner als 1 zu denken ist. Noch zweckmässiger aber wird es sein, den Ausdruck auf die Form $\frac{m m'}{r^2} [1 + \varphi(h)]$ zu bringen, in welcher endlich $\varphi(h)$ die Veränderung der elektrostatischen Kraft durch die Bewegung ausdrückt und mit der Geschwindigkeit zugleich zu 0 wird. Diese Formel gilt jedoch nur, wenn die Geschwindigkeit eine constante ist. Nehmen wir an, dass $m$ sich wieder $m'$, aber diesmal mit abnehmender Geschwindigkeit, nähere und dabei denselben Weg $\Delta r$ in derselben Zeit $\Delta t$ wie vorher zurücklege, so ist die Geschwindigkeit grösser, wenn $m$ sich noch näher an $x$ befindet, als wenn es in $q$ angelangt ist. Obgleich nun hier $m$ denselben Weg in derselben Zeit zurückgelegt und folglich $\frac{\Delta r}{\Delta t}$ denselben Werth hat, wie im ersten Falle, so kann doch die Abstossung im Punkt $q$ nicht mehr dieselbe sein. Das Molecül $m$ wird rascher bewegt in der Nähe von $x$ als näher bei $q$; es verweilte also längere Zeit an den Punkten, wo die Abstossungskraft stärker ist, als an denen, wo sie schwächer ist. Das Resultat muss offenbar sein, dass die Abstossung im Punkt $q$ jetzt stärker ist, als wenn die Geschwindigkeit constant geblieben wäre. Die Abstossung hängt also nicht bloss von der Geschwindigkeit, sondern auch von der Variation derselben und zwar so ab, dass die letztere Abhängigkeit die Grösse der Abstossungskraft vermehrt, und leicht ist zu zeigen, dass das Letztere bei allen Veränderungen der Geschwindigkeit eintreten wird. Da hier unter Geschwindigkeit natürlich immer die relative verstanden wird, so ist dieselbe mit $\frac{dr}{dt}$ und ihre Variation mit $\frac{d^2 r}{dt^2}$ zu bezeichnen, und danach wird die allgemeine Formel für die Wirkung zweier elektrischer Elemente $m m'$ auf einander:

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

$$-\frac{m m_1}{r^2}\left[1+\varphi\left(\frac{dr}{dt}\right)+\psi\left(\frac{d^2 r}{dt^2}\right)\right].$$

Aus dieser Formel für die Wirkung elektrischer Molecüle folgt leicht durch Addition auch der Ausdruck für die Wirkung zweier Stromelemente auf einander, und aus diesem lassen sich dann durch Vergleichung mit der Ampère'schen Formel die Formen der Functionen $\varphi$ und $\psi$ bestimmen. Wir können diesen Deductionen, die zu einer dem Weber'schen Gesetz ganz entsprechenden Formel führen, nicht weiter folgen und bemerken nur, dass Edlund auf Grund seiner beiden Hypothesen von der Gültigkeit des Archimedischen Princips in der Elektricitätslehre und von den successive erfolgenden Wirkungen der elektrischen Kräfte auch alle Probleme der galvanischen Induction zu lösen vermag. Auch hierbei steht er in der Mitte zwischen alten und neuen Anschauungen, indem er die Induction nicht bloss durch die unmittelbare Fernwirkung des strömenden Aethers auf den ruhenden in dem Leiterkreise, sondern auch durch eine Mitwirkung des Zwischenmediums entstehen lässt. Wenn ein geschlossener Strom in der Nachbarschaft einer geschlossenen Kette anfängt, so werden nach ihm die Gleichgewichtslagen der Aethermolecüle nicht bloss in der geschlossenen Kette verändert, sondern auch in dem umgebenden isolirenden Mittel, und der Inductionsstrom ist nichts anderes als der Uebergang der Molecüle aus der ersten Gleichgewichtslage in die zweite. Der neue Gleichgewichtszustand des Aethers in der geschlossenen Kette wird aber nicht alleinig bestimmt durch die directe Wirkung, welche der inducirende Strom auf ihn ausübt, sondern auch durch die Veränderung des Gleichgewichtszustandes im Aether des umgebenden isolirenden Mittels. Sobald der inducirende Strom aufhört, kehren die Aethermolecüle in ihre ursprüngliche Gleichgewichtslage zurück, und man hat demzufolge in der geschlossenen Kette den Inductionsstrom von gleicher Intensität, aber von entgegengesetzter Richtung wie im ersten Falle.

Edlund hat in höchst geistreicher Weise gezeigt, wie man die alte Anschauung von der alleinigen Abhängigkeit der Kraft von der Entfernung beibehalten und doch die von Weber behauptete Abhängigkeit der Kraftwirkung von der Geschwindigkeit und der Beschleunigung dazu annehmen kann. Trotzdem kann man nicht sagen, dass er nun wieder der rein Newton'schen Kraftanschauung zum Siege verholfen, was er wohl auch gar nicht beabsichtigt hat, vielmehr muss man erkennen, dass gerade die Edlund'sche Ansicht von der nicht momentanen, sondern successiven Fortpflanzung der Kraftwirkung mit der Auffassung der Kraft als einer actio in distans unvereinbar ist. Denn was im Raume sich bewegt und zwar mit bestimmbarer Geschwindigkeit sich bewegt, das kann nichts anderes sein als Materie, und seine Uebertragung

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

kann nichts anderes sein als eine Uebertragung von materiellen Bewegungen.

Edlund's Theorie wurde besonders nach zwei Seiten hin angegriffen, die den Anhängern der noch herrschenden Anschauung von dem Wesen der Elektricität besonders unannehmbar erschienen, das war einestheils die Annahme einer einzigen elektrischen, vielleicht mit dem Aether identischen Flüssigkeit und anderentheils die Erklärung der elektrischen Strömungen durch ein directes Abfliessen des Aethers. Ant. Roiti[1]) versuchte Fizeau's Methode, durch welche dieser das theilweise Mitführen des Aethers durch bewegte Flüssigkeiten nachgewiesen hatte, zum Entscheid über die letztere Frage anzuwenden. Er liess den elektrischen Strom das eine Mal in derselben, das andere Mal in entgegengesetzter Richtung mit den Lichtstrahlen laufen und gedachte an den Interferenzerscheinungen einen Einfluss der Stromrichtung auf die Lichtbewegung nachzuweisen. Die Versuche ergaben ein negatives Resultat, dem man aber als Gegeninstanz gegen die Edlund'sche Annahme der elektrischen als Aetherströmungen doch kein grosses Gewicht beilegte. Dass man ebenso zwischen der dualistischen und unitarischen Theorie zu keiner Entscheidung gelangte, haben wir schon erwähnt; speciell bei Gelegenheit der Edlund'schen Theorie glaubte C. Neumann wenigstens die Erscheinungen der unipolaren Induction für den Dualismus der elektrischen Materien anführen zu können. Faraday hatte in der zweiten Serie seiner Experimental Researches im Jahre 1832 gezeigt, dass in einem Leiterkreis ein Strom inducirt wird, auch wenn nur der eine Pol eines Magneten erregend wirkt. Er brachte nämlich das eine Ende eines Leitungsdrahtes mit dem Polende eines Magneten in Berührung, während das andere Ende des Drahtes auf der Mitte des Magneten schleifte; wurde

[1]) Nuovo Cimento (2) IX, 1873; Pogg. Ann. CL, S. 164. Einige Aeusserungen Roiti's sind charakteristisch für die theoretischen Anschauungen unserer Zeit. „Ohne Zweifel", sagt er, „sind die elektrischen und magnetischen Phänomene Bewegungsphänomene . . ., aber dennoch sind wir bei der theoretischen Behandlung der Elektricität immer noch gezwungen, die alte Hypothese von den Fluidis zu Hülfe zu nehmen, obwohl an deren reelle Existenz Niemand mehr glaubt. Von den zahlreichen Hypothesen, welche vorgeschlagen worden sind, um alle diese Phänomene auf die Bewegung des Aethers zurückzuführen . . .. ermangeln alle der experimentellen Basis. Die Drehung der Polarisationsebene des Lichtes durch den galvanischen Strom hat ihre Beweiskraft für jene Theorie verloren, weil man annimmt, dass die Elektricität auf den Lichtäther nicht direct, sondern nur durch Vermittelung der Körpermolecüle wirkt . . . Ich kann diesen Gegenstand nicht verlassen, ohne die Ansicht auszusprechen, dass, wie sehr ich auch die Bedenken gewisser Forscher gegen die alten elektrischen Fluida würdige . . ., ich dennoch es für verfrüht halte, die Erklärung der Elektricität und des Magnetismus in den Schulen auf neue Theorien zu gründen, welche zwar in besserer Uebereinstimmung mit den übrigen Lehren erscheinen, aber dadurch nicht aufhören blosse Hypothesen zu sein und minder vollständig sind als die alten." (Pogg. Ann. CL, S. 170 bis 171.) (Vergl. hiermit die Anm. [1]) a. S. 786.)

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

dann der Magnet in schnelle Rotation um seine Achse versetzt, so durchfloss den Leiter ein Inductionsstrom. W. Weber stellte im Jahre 1839 [1]) die allgemeinen Gesetze dieser sogenannten unipolaren Induction fest. Aus Versuchen Plücker's vom Jahre 1862 [2]) folgerte nun Neumann [3]), dass diese Erscheinungen durch die unitarische Theorie der Elektricität nicht erklärt werden könnten, und W. Weber [4]) schloss sich dieser Meinung an. Edlund [5]) aber behauptete dem gegenüber, dass alle Bedenken, die Neumann gegen die unitarische Theorie angeführt, auch gegen die dualistische gewendet werden könnten, und zeigte dann, dass man auch auf Grund der unitarischen Hypothese den Erscheinungen der unipolaren Induction vollständig gerecht zu werden vermöge.

Bei Edlund sind alle elektrischen Kräfte in ihrem letzten Grunde noch elementare Spannkräfte des Aethers, doch waren um jene Zeit auch schon tiefer kinetisch begründete Theorien der Elektricität vorhanden. Eine solche ziemlich ausgebildete Wirbeltheorie veröffentlichte Hankel [6]) in den Jahren 1865 und 1867. Wird danach ein Körper mit freier Elektricität geladen, so entstehen auf seiner Oberfläche in allen Punkten unendlich kleine kreisförmige Schwingungen (Wirbel), welche eine grosse Anzahl von Aethertheilchen (unter einer gewissen Theilnahme der Körpermolecüle) gemeinsam ausführen. Je nach der Richtung, in welcher diese Kreisschwingungen erfolgen, erscheint dann der Körper positiv oder negativ elektrisch. Diese Schwingungen auf der Oberfläche sind als stehende zu denken, durch Vermittelung des umgebenden Aethers aber können dieselben auch auf entfernte Punkte übertragen werden, wobei durch die Spannkräfte des Aethers Anziehungen und Abstossungen entstehen. Eine isolirende Substanz ist einer klaren Glastafel in ihrem Verhalten gegen das Licht vergleichbar, die elektrischen Schwingungen gehen einfach hindurch; auf den Leitern der Elektricität dagegen werden durch die in sie eintretenden fortschreitenden Schwingungen stehende Wirbel erregt. Die von einem elektrischen Körper ausgehenden Schwingungen erzeugen auf einem Leiter, z. B. einer Metallkugel, Schwingungen in ganz gleichem Sinne; diese Schwingungen erscheinen aber auf der dem elektrischen Körper zugewandten Seite (weil sie von der nicht entsprechenden Seite betrachtet werden) als entgegengesetzt und nur auf der von dem elektrischen Körper abgewandten Seite der Kugel den

---

[1]) Pogg. Ann. LII, S. 353, 1841; Resultate aus den Beobachtungen des magnet. Ver. 1839, S. 63.

[2]) Pogg. Ann. LXXXVII, S. 352, 1862.

[3]) Ibid. CLV, S. 228, 1875 u. CLIX, S. 301, 1876.

[4]) Ibid. CLVII, S. 146, 1876.

[5]) Ibid. CLVI, S. 590, 1875; CLVII, S. 630, 1876; CLX, S. 617, 1877.

[6]) Ibid. CXXVI, S. 440, 1865; CXXXI, S. 607, 1867. — W. G. Hankel, geb. am 17. Mai 1814 in Ermsleben, Prof. der Physik in Leipzig.

Theorie der Elektricität. Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

erzeugenden Schwingungen als gleich gerichtet. Die erstere Seite wird also als entgegengesetzt und die letztere Seite als gleich elektrisirt mit dem influirenden Körper erscheinen. Der galvanische Strom entsteht in einem Drahte dadurch, dass die in einem Querschnitt liegenden Aethermolecüle unter Betheiligung der ponderablen Molecüle einen in gemeinsamer Rotation um die Achse des Drahtes begriffenen Wirbel bilden und dass diese Wirbelbewegung sich in demselben Sinne längs des Drahtes fortpflanzt. Die galvanische Induction erklärt sich dadurch, dass diese Wirbelbewegung sich durch die Oberfläche des Drahtes hindurch dem umgebenden Aether mittheilt.

Principiell ähnliche Wirbeltheorien der Elektricität sind danach noch mehrfach ausgebildet worden, dieselben haben sich aber bis jetzt in ihrer Complicirtheit alle einer klaren Anschauung nur wenig zugänglich und einer mathematischen Behandlung kaum fähig erwiesen. Dieses letztere ist jedenfalls die Ursache gewesen, dass die Physico-Mathematiker in ihrer Mehrzahl noch kaum von solchen Theorien Notiz genommen haben. Indessen zeigten sich doch auch für die alte, so bequeme Anschauung der elektrischen Kräfte als elementarer, unvermittelt in die Ferne wirkender Grundeigenschaften besonderer elektrischer Materien nach und nach zunehmende Schwierigkeiten. So lange bei allen elektrischen Erscheinungen sich nur eine unveränderte Fortpflanzung der Wirkungen durch das Zwischenmedium, unabhängig von der besonderen Art desselben, gezeigt hatte, so lange liess sich auch die Kraftwirkung als eine unmittelbar momentane actio in distans betrachten. Die in neuerer Zeit immer deutlicher auftretenden Einflüsse der Polarisation des sogenannten Dielektricums aber drängten immer stärker darauf hin, die Fortpflanzung der elektrischen Wirkungen als durchaus abhängig von dem Medium und damit auch von der Zeit zu denken und die Ausbreitung derselben als eine durchaus vermittelte anzusehen. Danach erschien es angezeigt, diese Verbreitungsweise der elektrischen Kräfte wenigstens als Grundlage der mathematischen Behandlung anzunehmen, wenn man auch die Entstehungsweise der Wirkungen und ihre Abhängigkeit von dem Wesen der Materie selbst noch als zu schwierig ausser Berechnung liess und dieselben ohne Weiteres als gegeben annahm. Auf diesem Fundamente baute denn auch J. Cl. Maxwell[1]) seine genialen, weit umfassenden mathematischen Theorien der Elektricität und des Magnetismus auf. Anknüpfend an Faraday's Vorstellungen von dem Wesen des Dielektricums nimmt Maxwell ohne weiter zurückgehende Erklärungen an, dass jeder elektrische Körper das ihn umgebende, den ganzen Raum erfüllende Medium in einen Spannungszustand versetzt, der durch

[1]) Treatise on Electricity and Magnetism, London 1873; nach der 2. Auflage übersetzt Lehrbuch der Elektricität und des Magnetismus, Berlin 1883.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

die Art, wie die von dem elektrischen Körper ausgehenden Faraday'schen Kraftlinien im Raume verlaufen, bestimmt wird. Dieser Spannungszustand wirkt nämlich nach der Richtung der Kraftlinien attractiv als Zug, senkrecht zu diesen Linien aber repulsiv als Druck. Dadurch, dass Maxwell die Kraftlinien und den durch sie im Dielektricum bedingten Spannungszustand mathematisch bestimmt, kommt er dann zu Formeln für das Potential elektrischer Körper, die in ihren Resultaten mindestens ebenso gut wie die aus den älteren Kraftanschauungen entwickelten Gesetze mit der Erfahrung übereinstimmen. Ueber den Umstand, dass er den Spannungszustand nicht weiter aus den Eigenschaften des Mediums erklären kann, sagt Maxwell selbst[1]: „Das einzig Neue in dieser Untersuchung besteht in der Eruirung des mathematischen Ausdrucks für die Grösse der längs den Kraftlinien wirkenden Spannung und des senkrecht zu ihnen wirkenden Druckes und in dem Nachweise, dass dieser besondere Zustand wirklich die mechanischen Kräfte hervorzubringen im Stande ist, die man im elektromagnetischen Felde auf einen leitenden, nicht magnetischen und nicht magnetisirbaren Körper thatsächlich ausgeübt sieht. Doch habe ich nichts darüber sagen können, wie dieser Zwangszustand hervorgebracht, noch auch, wie er erhalten wird. Nur das sollte ins Klare gesetzt werden, dass man die gegenseitige Abstossung und Anziehung zweier Ströme durch den Zwang des sie umgebenden Mediums ebensogut wie durch die Fernwirkung der Ströme aufeinander zu erklären vermag. Die weitere Verfolgung des Zwangszustandes selbst, wie er etwa durch die Bewegung der Partikel des Mediums entsteht und erhalten wird, gehört einer ganz anderen Untersuchung an. Ob es möglich ist, eine solche Untersuchung durchzuführen, und welche Hypothesen etwa noch zu machen sein würden, das hat mit unseren Resultaten nichts zu thun[2].“ An einer anderen Stelle drückt er sich über dasselbe Thema folgendermaassen aus[3]: „Mit der Hypothese eines Zwangszustandes in dem Zwischenmedium sind wir aber nur einen Schritt in der Erkenntniss der Rolle, welche das Zwischenmedium bei der Fortleitung der elektrischen Kraft von einem elektrisirten Körper zum anderen spielt, vorwärts gekommen, denn einstweilen haben wir weder die Art und Weise dargelegt, wie dieser Zwang physikalisch entsteht, noch auch wie er erhalten wird. Der nächste Schritt, den wir zu machen hätten, müsste uns erklären, wie dieser Zwang durch die Einwirkung der einzelnen

---

[1]) Lehrbuch der Elektr. u. Magnet. I, S. 338.

[2]) Maxwell fügt hier hinzu: „Um dem Leser eine Idee von der Stärke des supponirten Zwanges zu geben, bemerke ich, dass die erdmagnetische Kraft in unseren Breiten die erdmagnetischen Kraftlinien mit etwa 0,9 mg pro 1 qd spannt. Die grösste von Joule (Sturgeon's Ann. of Electricity V, p. 187, 1840) durch Elektromagnete hervorgebrachte magnetische Spannung beträgt etwa 100 kg pro 1 qd.“

[3]) Lehrbuch der Elektr. u. Magnet. I. S. 163.

Partikel des Mediums auf einander zu Stande kommt. Er scheint mir deshalb von grosser Wichtigkeit zu sein, weil er Erscheinungen, die man sonst nur durch die Annahme der Existenz einer Wirkung in die Ferne hat erklären können, auf das Spiel molekularer Kräfte reduciren würde." Mit diesem dunkelen Punkt in Maxwell's Theorie hing ein anderer direct zusammen, nämlich die Unbekanntschaft mit der Wechselwirkung zwischen der ponderablen Materie und dem Zwischenmedium oder die Unkenntniss über die Umwandlungsart der elektromotorischen in ponderomotorische Kräfte und umgekehrt. „Man muss", sagt Maxwell in dieser Beziehung[1]), „unter elektromotorischer Kraft stets eine solche Kraft verstehen, die nur auf Elektricität, nie auf Körper wirkt. Sie darf also auch niemals mit dem, was wir mechanische Kraft nennen, confundirt werden, denn diese wirkt gerade umgekehrt auf Körper, nie auf Elektricität, die sich etwa in ihnen befindet. Wie die elektromotorischen Kräfte mit den mechanischen formell zusammenhängen, werden wir nicht eher erfahren können, als bis uns die Beziehungen, in denen die Elektricität zur Materie steht, völlig klar geworden sind." Als sichere Stützen seiner elektrischen Theorie führt Maxwell vor Allem die unleugbaren Beziehungen an, die zwischen dem Licht und der Elektricität existiren und die eine Identification des Zwischenmediums, in dem sich die elektrischen Wirkungen fortpflanzen, mit dem Lichtäther direct verlangen. Solcher Beziehungen aber lassen sich besonders drei erkennen. Erstens stimmt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes überein mit der Geschwindigkeit, welche sich aus der Theorie für die Fortpflanzung elektromagnetischer Störungen in einem Nichtleiter ergiebt und die dem Verhältniss der elektrostatischen zu den elektromagnetischen Elektricitätseinheiten gleich ist[2]). Zweitens müsste nach der Theorie der Brechungsindex (für die grössten Wellenlängen des Lichtes) gleich der Quadratwurzel aus der Dielektricitätsconstante des betreffenden Mediums sein, was für Paraffin auch mit ziemlicher Sicherheit nachgewiesen ist[3]). Drittens endlich zeigt der directe Einfluss des Magnetismus auf die Polarisationsebene des Lichtes einen so innigen Zusammenhang an, dass

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

---

[1]) Lehrbuch der Elektr. u. d. Magnet. II, S. 257.

[2]) Maxwell giebt zum Beweise folgende Tabelle (Lehrbuch der Elektr. u. d. Magnet. II, S. 543):

| Lichtgeschwindigkeit $\left(\frac{\text{Meter}}{\text{Sec.}}\right)$: | | Verhältniss der elektrischen Einheiten: | |
|---|---|---|---|
| Fizeau | 314 000 000 | Weber | 310 740 000 |
| Aberration u. s. f. / Sonnenparallaxe | 308 000 000 | Maxwell | 288 000 000 |
| | | Thomson | 282 000 000 |
| Foucault | 298 360 000 | | |

[3]) Lehrbuch der Elektr. u. d. Magnet. II, S. 543 bis 544.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik. c. 1860 bis c. 1880.

Maxwell sogar eine elektromagnetische Theorie des Lichtes aufzustellen versucht, die auf der Annahme beruht, dass das Licht eine elektromagnetische Störung ist [1]). Maxwell schliesst sein Werk mit den klaren Worten [2]): „Wir haben nun gesehen, dass die mathematischen Ausdrücke für die elektrodynamischen Kraftwirkungen Gauss zu der Ueberzeugung geführt haben, dass die Fortpflanzung der elektrischen Wirkungen mit der Zeit die wahre Grundlage einer Theorie der Elektrodynamik bilden müsse. Man kann aber eine Fortpflanzung sich nur so vorstellen, dass entweder etwas wie ein materielles Projectil durch den Raum fliegt oder dass der Vorgang in der Ausbreitung eines Bewegungs- oder Zwangszustandes durch ein im Raume vorhandenes Medium betsteht. In der Neumann'schen Theorie wird angenommen, dass der mathematische Begriff „„Potential““, das wir in keiner Weise als etwas Materielles aufzufassen im Stande sind, von einem Partikel zum anderen hinüber geworfen wird (unabhängig von der Existenz eines Mediums) . . . Riemann und Betti scheinen sich die Fortpflanzung etwas mehr der des Lichtes ähnlich gedacht zu haben . . . Bei allen diesen Theorien stösst einem aber naturgemäss die Frage auf: Wenn etwas von einem Partikel zu einem anderen durch einen Zwischenraum transportirt wird, in welchem Zustande befindet sich dann dieses Etwas, nachdem es das eine Partikel verlassen und bevor es das andere erreicht hat? . . . In der That, wird überhaupt Energie in endlicher Zeit, d. h. nicht instantan, von einem Körper zu einem anderen übergeführt, so muss es ein Medium geben, in welchem sie, nachdem sie den einen Körper verlassen, und bevor sie andere erreicht hat, sich mittlerweile aufhält . . . Daher müssen auch diese Theorien alle zu der Conception eines Mediums führen, in welchem die Fortpflanzung vor sich geht. Stimmt man (aber) einmal der Hypothese von der Existenz eines Mediums zu, so glaube ich, dass . . . wir (auch) mit allen Mitteln uns eine begreifliche Vorstellung von allen Details seiner Wirkungsweise zu verschaffen suchen sollten. Dies aber war stets mein Hauptbestreben, als ich dieses Werk ausarbeitete.“

Die bis hierher angeführten Theorien der Elektricität stammten fast ohne Ausnahme von Physico-Mathematikern her, die bestimmte Anschauungen über das Wesen der Elektricität als feste Grundlagen für ihre Deductionen bedurften. Nun aber wurden durch neue Erfahrungen, deren Erklärung auf Grund der gewohnten Annahmen nicht recht gelingen wollte, auch die Experimentalphysiker zu neuen Speculationen über die Natur der Elektricität angeregt. Diese neuen Erfahrungen betrafen vor Allem die Erscheinungen der elektrischen

---

[1]) Lehrbuch etc., II, S. 357 u. f. Maxwell bemerkt, dass L. Lorenz im Jahre 1867 (Pogg. Ann. CXXXI, S. 243) aus Kirchhoff's Gleichungen für die Bewegung elektrischer Ströme eine ähnliche elektromagnetische Theorie des Lichtes wie die seinige abgeleitet hat, betont aber, dass er seine Theorie schon 1865 in den Philosophical Transactions veröffentlicht habe.

[2]) Lehrbuch etc., II, S. 606 bis 607.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Entladung im luftleeren oder luftverdünnten Raume, auf deren Wichtigkeit allerdings schon Faraday in gehöriger Weise aufmerksam gemacht hatte. Dabei spielten zuerst noch die alten Probleme, die Leitungsfähigkeit des leeren Raumes, die Einwirkung des Magneten auf die Entladungserscheinungen, sowie die Schichtung des Lichtes in Geissler'schen Röhren die Hauptrolle.

Aeltere Versuche von P. Erman [1]), P. Riess [2]) u. A. schienen die Unmöglichkeit des Durchgangs der Elektricität durch den leeren Raum vollständig erwiesen zu haben. Da man aber bemerkte, dass die Entladung der Elektricität durch verdünnte Gase mit der wachsenden Verdünnung nicht erschwert, sondern vielmehr erleichtert wird, so wurde man über jene Ergebnisse wieder zweifelhaft, und manche Physiker waren geneigt, den leeren Raum im Gegentheil für den vollkommensten Leiter der Elektricität anzusehen. Doch wurde auch diese Ansicht wieder erschüttert, als weitere Versuche zeigten, dass die Leitungsfähigkeit der Gase mit der Verdünnung nicht gleichmässig wächst und dass sie mit wachsender Verdünnung eine für jedes Gas besondere maximale Grenze erreicht. A. de la Rive glaubte 1866 [3]) diese Grenze für Wasserstoff auf 2,5 mm Quecksilberdruck festsetzen zu können, und Gassiot hatte 1861 [4]) schon wieder Versuche beschrieben, die auf einen gänzlichen Mangel einer Leitungsfähigkeit des leeren Raumes deuteten. Die Erklärung dieser merkwürdigen Erscheinungen war auch nicht so schwer als es zuerst schien. Nimmt man an, dass die Leitung der Elektricität in Gasen nicht durch ein eigentliches Strömen der Elektricität in denselben, sondern nur durch Convection auf die Weise geschieht, dass die Gasmolecüle bei ihren Zusammenstössen auf der einen Seite Elektricität aufnehmen und auf der anderen Seite abgeben, so wird allerdings die Schnelligkeit der Leitung mit dem Wachsen der Verdünnung und der mittleren Weglänge der Gasmolecüle sich vermehren, aber zugleich wird auch wegen der geringeren Massen, die die Leitung bewirken, die Menge der fortgeleiteten Elektricität abnehmen, und so mögen wirklich die beiden nach entgegengesetzten Richtungen wirkenden Ursachen für gewisse Grade der Verdünnung ein Maximum der Leitungsfähigkeit bedingen. Edlund freilich musste solche Ansichten principiell verwerfen. Da nach ihm die elektrischen Erscheinungen nur auf einer translatorischen Bewegung des Aethers, nicht der ponderablen Gasmolecüle, beruhen, so muss nothwendig die Fortpflanzung des elektrischen Stromes durch den sogenannten leeren Raum an sich leichter möglich sein als durch den erfüllten. Edlund [5]) leugnet nun zwar nicht, dass der Strom bei der bis ins Unendliche gehenden Verdünnung

---

[1]) Gilb. Ann. XI, S. 163, 1802.

[2]) Dove's Repertorium II, S. 13 u. f., 1838.

[3]) Pogg. Ann. CXXXI, S. 447, 1867.

[4]) Proc. of the Roy. Soc. XII, p. 329; Pogg. Ann. CXII, S. 156.

[5]) Ann. de chim. et de phys. (5) XXIV, p. 199; XXVII, p. 114 u. a.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

zuletzt einen unendlich grossen Widerstand erfährt, aber er macht dem gegenüber darauf aufmerksam, dass man doch im leeren Raume durch Influenz elektrische Erscheinungen hervorrufen kann, und erklärt dann jenen Widerstand nicht als hervorgerufen durch den leeren Raum, sondern als einen Uebergangswiderstand zwischen den festen Elektroden und dem Gas, der mit der Verdünnung bis ins Unendliche wächst und der die Verminderung des Widerstandes durch die Verdünnung des Gases überwiegt. Damit stimmte vollständig E. Goldstein[1]) überein, der auch den Einwand widerlegte, dass darum schon der Aether nicht allein bei der elektrischen Entladung betheiligt sein könne, weil ja jedes Gas in der Entladung ein eigenes charakteristisches Spectrum besitze. Nach ihm erklärt sich das leicht aus der Thatsache, dass dem Aether das optische Emissionsvermögen gänzlich fehlt und dass also die Aetherbewegungen an sich lichtlos sind. Erst wenn die Aetherbewegungen auf die Gasreste in den Entladungsröhren durch Resonanz übertragen werden, entstehen die Lichterscheinungen, die dann natürlich das den betreffenden Gasen eigenthümliche Spectrum zeigen. Auch Eilh. Wiedemann[2]) zeigt sich diesen Ansichten günstig, und nach ihm ist die geringe Erwärmung, welche die positive Entladung in ganz verdünnten Gasen hervorbringt, ein directes Zeichen für die gute Wärmeleitungsfähigkeit der letzteren. Trotzdem scheint die Mehrzahl der Physiker der Annahme einer Leitungsfähigkeit des leeren Raumes, die allerdings einer Aufgabe der alten Anschauungen vom Wesen der Elektricität fast gleichkommen würde, noch ziemlich abgeneigt und gewillt zu sein, erst noch zwingendere experimentelle Beweise abzuwarten[3]).

Die Verschiedenheit des Anoden- und Kathodenlichtes in luftverdünnten Räumen und den dunkeln Raum zwischen beiden hatte Faraday im Jahre 1838 entdeckt; Abria hatte 1843[4]), als er die Verdünnung im elektrischen Ei bis auf 2 mm trieb, die abwechselnd

---

[1]) Wiedem. Ann. XII, S. 249, 1881; XXIV, S. 79, 1885. An letzterer Stelle betont E. Goldstein ausdrücklich, dass er zuerst und noch vor Edlund als Substrat der elektrischen Entladung in einem gaserfülltem Raume den freien Aether genannt habe. „Gegenüber der Anschauung", so sagt Goldstein, „dass die Entladung in einem gaserfüllten Raume zum Substrat die Gastheilchen selbst hat, sei es, dass letztere in einem convectiven Process, sei es als Leiter eines Stromes die Entladung vermitteln, habe ich, und zwar, wie ich glaube zuerst, den freien Aether als Träger der Entladung betrachtet . . . Die bezüglich dieses Gegenstandes in neuerer Zeit vielfach und fast ausschliesslich citirte Arbeit von Herrn Edlund wurde der schwedischen Akademie zwei Monate später vorgelegt, nachdem meine Arbeit schon in Wiedemann's Annalen erschienen war." (Auch Sitzungsber. d. Berl. Akad. 1884, S. 63.)

[2]) Wiedem. Ann. VI, S. 298, 1879; G. Wiedemann, Die Lehre von der Elektricität, Braunschweig 1885, IV, S. 591.

[3]) A. Föppl (Wiedem. Ann. XXXIII, S. 492, 1888) meint aus neuen Versuchen wieder schliessen zu dürfen, dass der leere Raum kein guter Leiter der Elektricität sein könne.

[4]) Ann. de chim. et de phys. (3) VII, p. 462.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

dunkeln und hellen Schichten in demselben beobachtet. Die Erscheinungen aber wurden zuerst so wenig beachtet, dass Quet[1]) sich die Beobachtung derselben als neu zuschreiben und andere Physiker sie auch Grove[2]) zueignen konnten. Dafür waren die Erklärungen der Erscheinungen, als erst das Interesse an denselben mehr erwachte, um so mannigfaltiger. Riess[3]) unterschied die elektrischen Entladungen überhaupt in continuirliche oder discontinuirliche, je nachdem die Elektricitäten in guten Leitern sich in einem ununterbrochenen Strome ausgleichen oder schlechtere Leiter nur in bestimmten Pausen durchbrechen. Derselbe führte ungezwungen das geschichtete Licht auf die discontinuirlichen Theilentladungen zurück, die getrennt durch die Gase hindurchgehen. Quet und Séguin[4]) leiteten die Lichtschichten aus Schichten der Gase ab, die sich wie feste Nichtleiter durch Influenz in abwechselnd positiv und negativ elektrische Schichten theilen sollten. Aug. de la Rive[5]) fand experimentell, dass der dunkle Kathodenraum besser leitet als die helle Schicht, und verglich danach das geschichtete Licht mit einer abwechselnd aus Platin- und Silbergliedern gebildeten Kette, bei der nur die Platinringe durch den galvanischen Strom zum Glühen gebracht werden. Eine vom vorigen ganz abweichende Erklärung, die sich mehr an die mechanische Gastheorie anschloss, gaben G. Wiedemann und R. Rühlmann[6]). Nach ihnen werden die Gastheilchen an den Elektroden mit so grosser Geschwindigkeit fortgeschleudert, dass sie dabei leuchtend werden. An der nächsten ruhenden Gasschicht verlieren diese Theilchen ihre lebendige Kraft, gleichen sich aber mit den entgegengesetzt elektrischen Theilen der Gasschicht so aus, dass nun statt ihrer die entsprechend elektrischen Theilchen der Gasschicht leuchtend weiter schreiten. Die Ausgleichsstellen der von den entgegengesetzten Elektroden kommenden Molecülströme sind dann mit den dunkeln Stellen in den Röhren identisch. Indessen complicirten sich diese Erscheinungen gerade am Anfange der siebziger Jahre

[1]) Compt. rend. XXXV, p. 949, 1852; Pogg. Ann Ergänzungsb. IV, S. 507. — Jean Antoine Quet, 1810 bis 1884, Rector der Akademie zu Besançon.

[2]) Phil. Trans. 1852, p. 87 bis 101.

[3]) Pogg. Ann. XCVIII, S. 571, 1856; CII, S. 177; CVI, S. 56. — Gassiot erzeugte das geschichtete Licht nicht nur durch Inductionsapparate, sondern auch durch die continuirlichen Ströme sehr starker Volta'scher Batterien. Er schloss daraus, dass auch die gewöhnlichen Entladungen der letzteren intermittirend seien und dass auch diese Entladungen aus einer Reihe von Pulsationen bestünden, deren Geschwindigkeit von dem Widerstande abhängt. (Pogg. Ann. CXII, S. 158, 1861.)

[4]) Ann. de chim. et de phys. (3) LXV, p. 317, 1862.

[5]) Pogg. Ann. CXXXI, S. 446 u. 577, 1867. — Aug. de la Rive, 9. Oct. 1801 Genf — 27. November 1873 Marseille, zuerst Prof. d. Physik in Genf, später Privatmann.

[6]) Ber. der K. Sächs. Gesellsch. d. W. XXIII, S. 333, 1871. Pogg. Ann. CXLV, S. 394; eine Fortsetzung der Abhandlung von Wiedemann allein in Pogg. Ann. CLVIII, S. 85 u. 252, 1876. — R. Rühlmann, Prof. am Gymnasium in Chemnitz.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

durch das Erzeugen immer stärkerer Gasverdünnungen so sehr, dass ihre Erklärung ohne die Aufnahme neuer Principien, neuer Zustände der ponderablen Materie oder neuer directer Einwirkungen des Aethers nicht möglich erschien. Den Reigen dieser Arbeiten eröffnete Hittorf im Jahre 1869 [1]) mit einer grösseren Abhandlung „über die Elektricitätsleitung der Gase". Darin gab er an, dass das dunkle Glimmlicht an der Kathode, wenn die Verdünnung des Gases unter 1 mm Quecksilberdruck heruntergegangen, sich schnell ausbreitet und schliesslich die ganze Röhre erfüllt und dass dieses Glimmlicht an allen Orten, wo es auf die Wände der Röhre auftritt, ziemlich starke Phosphorescenz erregt. Endlich beschrieb er dort auch die mannigfaltigen Einflüsse des Magnetismus auf das Licht in den Geissler'schen Röhren genauer, die allerdings theilweise schon bekannt waren. Grösseres Aufsehen indessen und ganz allgemeine Beachtung erregten erst die Beobachtungen derselben Erscheinungen, die Crookes [2]) am Ende der siebziger Jahre beschrieb und mit sehr weitgehenden theoretischen Speculationen begleitete. Auch Crookes ging von der Beobachtung aus, dass mit zunehmender Verdünnung der dunkle Kathodenraum sich immer mehr ausbreitet und schliesslich das Anodenlicht ganz zurückdrängt. Da nun mit der Verdünnung der Gase auch die mittlere freie Weglänge ihrer Molecüle wächst, so lag es nahe, die Erstreckung des dunkeln Kathodenraumes

---

[1]) Pogg. Ann. CXXXVI, S. 1 u. 197, 1869; Fortsetzung in Pogg. Ann. Jubelband, S. 430, 1874. Hittorf's Worte über die theoretische Wichtigkeit der Entladungserscheinungen sind charakteristisch: „Der dunkelste Theil der heutigen Elektricitätslehre ist unstreitig der Vorgang, durch welchen in gasförmigen Körpern die Fortpflanzung des Stromes vermittelt wird. Während für die festen und flüssigen Leiter, sie mögen Metalle oder elektrolytische sein, die thatsächlichen Verhältnisse in Zusammenhang gebracht sind und in dem Ohm'schen Gesetze das verkettende Band gewonnen haben, besitzen unsere Kenntnisse über die Leitung der Gase trotz der Bemühungen ausgezeichneter Physiker noch einen entschieden fragmentarischen Charakter und stützen sich vielfach auf Beobachtungen, welche unvollständig und isolirt bleiben. Die Theorie des elektrischen Funkens, dieser am längsten bekannten und auffallendsten aller elektrischen Erscheinungen, kann erst entstehen, wenn der Zustand unseres Wissens ein besserer geworden ist." (Pogg. Ann. CXXXVI, S. 1.)

[2]) Die erste Mittheilung über diese Beobachtungen machte Crookes der Royal Society am 5. December 1878; dieselbe ist im Auszug in den Proc. of the Roy. Soc. XXVIII, p. 103, 1878 abgedruckt unter dem Titel: On the illumination of lines of molecular pressure and the trajectory of molecules, ausführlich in den Phil. Trans. 1879, p. 135. In diesen Blättern finden sich auch die zahlreichen weiteren Abhandlungen von Crookes über dieses Thema. (Proc. of the Roy. Soc. XXVIII, p. 477; XXX, p. 469 u. s. w.) Von einem umfassenden Vortrage, den Crookes am 22. August 1879 vor der British Association in Sheffield hielt, ist eine deutsche Uebersetzung „Strahlende Materie oder der vierte Aggregatzustand", Leipzig 1879, erschienen.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

von dieser freien Weglänge abhängig zu denken, Crookes aber identificirte diese beiden Strecken vollständig. Nach ihm ist der moleculare Zustand der Gase, wenn durch Verdünnung die freie Weglänge der Molecüle mit den Dimensionen des Gefässes vergleichbar geworden ist, dem gasartigen Aggregatzustande seiner ganzen Eigenthümlichkeit nach nicht mehr zuzuzählen und folgt dann ganz anderen Gesetzen als dieser; Crookes bezeichnet diesen ultragasigen Zustand als einen vierten Aggregatzustand und die Materie in diesem Zustande als „strahlende Materie“ [1]). Die Molecüle dieser ultragasigen Materie werden von den Elektroden mit ungeheuren Geschwindigkeiten fortgestossen und zwar von der Kathode mit noch grösserer Geschwindigkeit als von der Anode. Der dunkle Kathodenraum ist dann der Raum, in welchem die negativen Gasmolecüle frei von der Kathode wegfliegend ohne Zusammenstösse sich geradlinig bewegen und an dessen Grenze sie erst von den ihnen entgegenkommenden positiven aufgehalten werden. Ueber das physikalische Verhalten der strahlenden Materie giebt Crookes die folgenden Sätze: 1) Strahlende Materie übt, wo sie auftrifft, eine kräftige phosphorogene Wirkung aus. Treibt man die Verdünnung des Gases so weit, dass der dunkle Kathodenraum bis zur Gegenwand reicht, so wird diese durch das Auftreffen der Gasmolecüle leuchtend; auch andere Substanzen, wie Diamant, künstliche Thonerde etc. phosphoresciren in dem Molecularstrome. Materie im gewöhnlichen Gaszustande erregt keine Phosphorescenz, weil die Geschwindigkeit der Molecüle zu gering ist. 2) Strahlende Materie bewegt sich in gerader Linie. Bringt man in einer sehr stark luftverdünnten Röhre z. B. drei positive und einen negativen Pol an beliebigen Stellen an, so zeigt sich bei mässiger Verdünnung die ganze Röhre mit dem Lichte erfüllt. Bei starker Verdünnung aber sieht man nur die dem negativen Pole gegenüberliegende Stelle der Wand im Phosphorescenzlicht leuchten, deren Lage also von der Lage der drei positiven Pole ganz unabhängig ist. 3) Strahlende Materie, von einem festen Körper aufgefangen, wirft einen Schatten. Stellt man in den Weg der von der Kathode ausgehenden Strahlen ein

---

[1]) Den Ausdruck strahlende Materie hat Crookes von Faraday angenommen, der denselben im Jahre 1816 bei seinen Erstlingsversuchen über die Eigenschaften der Materie gebraucht hatte. Auch Zantedeschi hatte schon 1848 un quarto stato della materia entdeckt, den die Materie bei sehr hohen Temperaturen annimmt. Er setzte zwei irdene Platten, die eine mit Zeichnungen aus Eisen- oder Kobaltoxyd versehen, die andere ungefärbt, einander gegenüber der Hitze eines Töpferofens aus und fand, dass dann auf der ungefärbten Platte genau die Zeichnung der anderen sich abbildete. Diese Uebertragung schrieb er einer Strahlung der Oxyde zu und nahm zu diesem Behufe einen vierten Zustand, „den Zustand der Strahlung der Materie“ an. (Die Fortschritte der Physik im Jahre 1848 nach Raccolta fisico-chimico-italiana III, 1848.)

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

(durchsichtiges) Kreuz, so sieht man an der phosphorescirenden Wand den Schatten desselben. 4) Strahlende Materie übt eine kräftige mechanische Wirkung aus; sie bewegt z. B. eine in ihren Weg gestellte kleine Lichtmühle. 5) Strahlende Materie wird vom Magneten abgelenkt; parallele Ströme strahlender Materie verhalten sich nicht zu einander wie galvanische Ströme, sondern wie gleichnamig elektrisirte Körper. 6) Strahlende Materie erzeugt, wo sie auftrifft, Wärme. Giebt man der Kathode die Form eines Hohlspiegels, so werden in dem Brennpunkte desselben bei genügender Intensität der Entladung selbst Legirungen von Platin und Iridium geschmolzen [1]).

Crookes versprach sich sehr viel von dem neu entdeckten Zustande der Materie, von der neuen Welt, in der die körperliche Theorie des Lichtes Gültigkeit habe, die wir wohl von aussen beobachten, in die wir aber niemals eindringen könnten [2]). Die meisten anderen Physiker indessen, vor Allem die deutschen, waren der neuen Welt sehr wenig freundlich gesinnt und glaubten auch ohne den vierten, noch mit den drei alten Aggregatzuständen der Materie auskommen zu können. E. Goldstein, der noch vor Crookes im Jahre 1876 einige Eigenthümlichkeiten der Kathodenstrahlen beschrieben, zeigte im Jahre 1880 [3]), dass keineswegs die Weite des dunklen Kathodenraumes, wie Crookes es gethan, mit der freien Weglänge der Molecüle identificirt werden könnte. Er stellte eine der Phosphorescenz fähige Platte so in der Röhre in der Richtung der Kathodenstrahlen auf, dass sie noch theilweise in dem dunklen Kathodenraume lag. Dann zeigte sich, dass dieser Raum gar nicht scharf begrenzt war, sondern dass die Lichtintensität sich ganz allmälig änderte; auch betrug bei Gasdichten nicht unter $^1/_{125}$ mm, wo nach Maxwell die freie Weglänge gleich 5,7 mm wäre, die Dicke der dunklen Schicht 10 mal so viel, und sogar in 0,9 m Entfernung von der Kathode phosphorescirte eine Fläche noch hell; endlich fanden die Kathodenstrahlen an der Grenze der dunklen Schicht keineswegs ihr wirkliches Ende, sondern konnten bei sehr grosser Verdünnung sogar das geschichtete Licht der Anode noch durchdringen. W. F. Gintl [4]) betonte, dass man auch ohne den ultragasigen Zustand der Materie alle Erscheinungen in den Crookes'schen Röhren erklären könne, wenn man nur annehme, dass durch den elektrischen Strom von der Oberfläche der

---

[1]) Nach dem Jahrb. der Erfindungen XVI, S. 185 u. f., 1880.

[2]) „The phenomena, so sagt Crookes (Proc. of the Roy. Soc. XXVIII, p. 111), in these exhausted tubes reveal to physical science a new world — a world where matter exists in a fourth state, where the corpuscular theory of light holds good and where light does not always move in a straight line, but where we can never enter, and in which we must be content to observe and experiment from the outside."

[3]) Monatsber. d. Berl. Akad. 1880, S. 82; auch Wiedem. Ann. XI, S. 844.

[4]) Studien über Crookes' strahlende Materie, Prag 1880.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Kathode immerwährend metallische Theilchen losgerissen würden, die sich geradlinig dann vom Pole hinweg bewegen, so lange bis ein Widerstand ihre Bewegung ändert oder absorbirt. J. Puluj [1]) bildete diese Hypothese weiter aus, dadurch dass er sie mit Edlund's unitarischer Elektricitätstheorie verband. Durch die chemischen Kräfte wird danach in der galvanischen Batterie ein Aetherstrom erregt, der sich beim Eintritt in einen Leiter von grösserem Widerstande stauen und dadurch einen positiven Pol erzeugen, beim Austritte aus demselben aber verdünnen und einen negativen Pol erzeugen muss. Darum bildet sich in dem Flammenbogen der elektrischen Lampen, wo die Luftstrecke zwischen den Kohlenspitzen einen grösseren Widerstand bietet, da, wo die Elektricität austritt, ein positiver Pol. Umgekehrt aber liegt die Sache bei dem Inductionsstrome in den Geissler'schen Röhren, weil bei der grossen Spannung des Stromes die Luftstrecke in den Röhren einen geringeren Widerstand besitzt. Hier entsteht an der Eintrittsstelle des Aetherstromes in die Gassäule ein Mangel an Aether und damit freie, negative Spannung, während an dem anderen Ende derselben freie, positive Spannung erzeugt wird. Zwischen den beiden Enden muss mindestens eine Stelle vorhanden sein, wo die Spannung gleich Null ist, das ist die Grenze des dunklen Kathodenraumes; eine Schichtung des Lichtes deutet auf mehrere Stellen solcher Nullspannungen hin. Der starke Aetherstrom, der vom negativen Pole ausgeht, reisst von diesem Theilchen seiner Substanz mit, die in geraden Linien von demselben fortfliegend die Erscheinungen der vermeintlichen strahlenden Materie erzeugen und die ihr Dasein durch schöne Metallspiegel an den Wänden der Röhren unwiderleglich anzeigen [2]). Beim Aufprallen der Kathodentheilchen auf die Wände setzt sich die lebendige Kraft derselben in Wärme um, aber diese Wärme ist nicht gross genug, um Phosphorescenz zu erzeugen, diese letztere muss von dem Aether abgeleitet werden, welchen die Kathodentheilchen mit sich führen. Treffen nämlich diese negativ elektrischen Elektrodentheilchen auf die Glaswand, so wird ausser der Erschütterung der körperlichen Molecüle auch ein Ausgleich des Aethers zwischen den Theilchen der Wand und den Molecülen stattfinden; die hierdurch verursachten Erschütterungen der Aetherhüllen machen dann jede Stelle der getroffenen Wand zu Mittelpunkten neuer Aetherwellen, welche

---

[1]) Strahlende Elektrodenmaterie, Wien. Ber. LXXXI, 2. Abth., S. 864, 1880.

[2]) Aehnlich spricht sich über das Fortreissen von Kathodentheilchen Plücker schon 1858 aus (Pogg. Ann. CV, S. 67): „Ich finde meine Auffassungsweise, dass von einer Elektrode zur anderen keine Metalltheilchen übergeführt werden, durch Herrn Gassiot (Proc. of the Roy. Soc. 1858, March 4) bestätigt. Es geht Metall nur von der einzelnen Elektrode, der negativen, zu dem Theile der inneren Glaswand, welcher dieselbe zunächst umgiebt, und diese Ueberführung findet statt, aus welchem Metall auch die Elektrode bestehen mag. Die umgebende Glaswand wird durch die Ablagerung des ungemein fein zertheilten Metalles allmälig geschwärzt, und bei grosser Dicke der Ablagerung bildet sich zuletzt ein schöner Metallspiegel."

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

letztere wir als Phosphorescenzlicht empfinden. Hielten diese Erklärungen noch immer den von Rühlmann und G. Wiedemann angegebenen Grundgedanken fest, nach welchem die Kathodenstrahlen durch fortfliegende, materielle Theilchen erzeugt werden, so meinte nun E. Wiedemann auch diesen aufgeben und die Kathodenstrahlen gänzlich als Lichtstrahlen ansehen zu müssen, vor Allem darum, weil die geringe Menge der fortgeführten ponderablen Substanz zur Erklärung der Wärmeentwickelungen an den Glaswänden nothwendig eine ganz ungeheure Geschwindigkeit der fortgerissenen Theilchen fordere. E. Wiedemann beschreibt den Vorgang der Entladung [1]) folgendermaassen. Die von einer Maschine gelieferte Elektricität, welche man als freien Aether denken kann, häuft sich an der Oberfläche der Elektroden an und erzeugt in dem umgebenden Medium eine dielektrische Polarisation in der Weise, dass die Aetherhüllen der einzelnen Gasmolecüle deformirt werden, während die Rotationen der Molecüle um ihre Achsen ihre Richtung beibehalten. Wächst die Dichte der Elektricität an den Elektroden zu einer gewissen Stärke an, so tritt die Entladung derselben ein, d. h. die Aenderung der dielektrischen Polarisation pflanzt sich durch die Aetherhülle der Gasmolecüle fort und versetzt sie dadurch in Schwingungen [2]), und zugleich kann auch freier Aether von Molecül zu Molecül übergehen. Die so sehr grossen Unterschiede im Verhalten der positiven und negativen Elektricität lassen sich vielleicht dadurch erklären, dass die Fortpflanzung der letzteren nur durch eine Fortpflanzung der dielektrischen Polarisation bedingt wird, während die der ersteren zugleich mit dem Uebergange von freiem Aether verknüpft ist. Die Lichterscheinungen in den Crookes'schen Röhren zeigen bei plattenförmigen Elektroden folgende Anordnung [3]) (s. d. nebenstehende Figur).




Zunächst lagert sich um die Kathode eine von Licht fast entblösste Partie, der dunkle Kathodenraum $k$, an sie schliesst sich eine nach der Kathode scharf begrenzte Schicht, die helle Kathodenschicht $b$; von dieser geht nach der Anode zu ein immer verwaschener werdendes Licht, das Glimmlicht $bp$,

---

[1]) Wiedem. Ann. X, S. 250, 1880.

[2]) Die lebendige Kraft dieser Schwingungen, die von den translatorischen Wärmebewegungen der Molecüle unabhängig ist, erklärt das von Wiedemann constatirte Leuchten der Gase bei sehr geringen Temperaturen, weit unter $100^0$ (Wiedem. Ann. VI, S. 298). Doch wird bei den Zusammenstössen der Molecüle auch diese lebendige Kraft sich in translatorische Wärmebewegung umsetzen.

[3]) Wiedem. Ann. XX, S. 756, 1883.

Theorie der Elektricität. Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

das aber von der geschichteten Lichtsäule der Anode wieder durch einen dunklen Raum $hp$ getrennt ist. Das Ganze endlich wird von dunklen Strahlen, den Kathodenstrahlen $lm$, durchsetzt, die von der Kathode ausgehen und erst an entgegenstehenden Körpern phosphorescirend leuchten. Die Erklärung dieser Erscheinungen folgt aus der gegebenen Vorstellung von dem Wesen des elektrischen Stromes. Von der Anode pflanzen sich Wellen einer dielektrischen Polarisation, gefolgt von einem Strome freier Elektricität, fort, die an der hellen Kathodenschicht reflectirt werden. Zwischen diesen reflectirten und ankommenden Wellen entstehen dann Interferenzen, Wellen maximaler und minimaler Bewegung, gegen welche die nachströmende Elektricität natürlich ein verschiedenes Verhalten zeigt; an den ersteren Stellen werden die Gase leuchtend, an den letzteren nicht. Der dunkle Raum zwischen dem Anoden- und Kathodenlicht entspricht dabei der ersten Interferenzstelle. Die Kathodenstrahlen [1]) haben mit dem elektrischen Strome, der Ueberführung der Elektricität selbst, weiter nichts zu thun, sie sind blosse Lichtstrahlen mit sehr kurzer Wellenlänge und darum unsichtbar, die von der Kathode ausgehen und beim Auftreffen auf ponderable Materie sich durch Verkürzung ihrer Schwingungsdauer in leuchtende Wellen umsetzen. Damit stimmt überein, dass die Kathodenstrahlen mit ihren Bewegungen senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung das aus longitudinalen Schwingungen bestehende Anodenlicht ohne Störung durchsetzen können, dass die Kathodenstrahlen mit ihren kleinen Wellenlängen selbst von den dünnsten materiellen Schichten absorbirt werden und ebenso Phosphorescenz und Fluorescenz erregen, wie chemische Zersetzungen einleiten [2]), dass sie wie gewöhnliche Lichtstrahlen reflectirt werden u. s. w.

[1]) Wiedem. Ann. XX, S. 781.

[2]) Arthur Schuster (Professor in Manchester) wird durch die starke chemische Dissociation, welche das Spectrum des Glühlichtes am negativen Pole stets anzeigt, veranlasst, sich wieder der älteren Theorie der Entladung in Gasen zu nähern. Nach ihm ist der Uebergang der Elektricität in einem Gase stets begleitet von einer Zersetzung der Molecüle und einem Austausch der Atome. Am negativen Pol scheint die Zersetzung am stärksten zu sein. Wegen des schnellen Abfalles des Potentials in der Nähe dieses Poles müssen dann die negativen Atome denselben mit grosser Geschwindigkeit verlassen und der dunkle Kathodenraum ist mit diesen strömenden Atomen angefüllt. Die Grenze dieses Raumes bildet für die positive Entladung den negativen Pol. Wenn der dunkle Raum klein ist, so dass er nicht bis zum positiven Pole reicht, dann geht die Entladung von dem letzteren nach dem negativen Pole hin. Wächst aber mit stärkerer Verdünnung der dunkle Raum bis über den positiven Pol hinaus, so geht die Entladung von diesem nach dem nächsten Punkte des dunklen Raumes, also gerade hinweg vom negativen Pole. (Nature XXX, p. 230, 1884; Proc. of the Roy. Soc. XXXVII, p. 317, 1884.) O. Lehmann, der sich mit den je nach der Intensität der Elektricität, der Dichte des Gases, der Entfernung, Zahl und Gestalt der Elektroden, der Form des Gefässes, der Temperatur etc. sehr verschiedenen Formen der Entladung eingehend beschäftigt, ohne gerade auf die zuletzt erwähnten Erscheinungen in äusserst verdünnten Gasen besonders einzugehen, behauptet, dass nur die

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Hatten sich so auch die Experimentalphysiker der unitarischen und damit der Aethertheorie der Elektricität mehr und mehr genähert, so war damit doch noch keine eigentliche kinetische Theorie derselben ausgebildet; denn noch immer lag die Ursache der elektrischen Kräfte in den elastischen Kräften des Aethers oder wurde überhaupt nicht weiter discutirt. Nur durch Analogieschlüsse versuchte man auch für die anziehenden und abstossenden Kräfte der Elektricität die Möglichkeit kinetischer Ableitungen darzulegen. Auf gewisse Aehnlichkeiten der Formeln, welche für das Fliessen der Luft und des Wassers in engen Röhren gelten, mit denen, welche das Strömen der Wärme und der Elektricität charakterisiren, hatte man schon mehrfach aufmerksam gemacht. Die früher erwähnten akustischen Anziehungen und Abstossungen bewiesen auch, dass ein undulirendes Medium ohne besondere Kräfte nur durch seine Bewegungen anziehend und abstossend wirken könnte. Jetzt brachte man für diese letztere Thatsache noch mehrere Beispiele, die direct auf eine Illustration der elektrischen Wirkungen berechnet waren. Prof. C. A. Bjerknes aus Christiania experimentirte im Jahre 1881 [1]) auf der elektrischen Ausstellung in Paris mit vibrirenden Trommeln, die sich in Wasser befanden. Dieselben bestanden aus metallenen Ringen von etwa 2 cm Durchmesser, auf welche beiderseits Kautschukmembranen aufgezogen waren und in denen vermittelst angesetzter Röhren, die zugleich zum Halten derselben dienten, die Luft abwechselnd verdichtet und verdünnt werden konnte. Erfolgen in beiden Trommeln die Compressionen und Dilatationen gleichzeitig, so nähern sie sich einander, im entgegengesetzten Falle stossen sich die Trommeln ab. Da auch dabei die wirksamen Kräfte sich verhalten umgekehrt wie die Quadrate der Abstände der Trommeln, so kann man wohl die pulsirenden Körper mit magnetischen Polen oder elektrisch geladenen Körpern vergleichen. Wurde eine solche Trommel durch eine Scheidewand in zwei Hälften getheilt und die Luft in beiden Hälften abwechselnd verdichtet und verdünnt, so verhielt sich die Trommel auch wie ein Magnet mit zwei Polen, sie zog an der einen Seite an, während sie an der anderen abstiess. Aehnlich wie pulsirende Trommeln übten auch kleine Kugeln, die sich an Querarmen pendelartig bewegten, im Wasser anziehende und abstossende Kräfte auf einander aus und zwar die ersteren, wenn die Schwingungen einander entgegen-, die letzteren, wenn sie gleichgerichtet geschahen; da die entgegengesetzten Seiten der Kugeln dabei immer in entgegengesetzter Phase sich bewegen, so gleicht eine solche oscillirende Kugel auch immer einem zweipoligen Magneten. Durch die Bewegungen der Trommeln oder Kugeln werden natürlich auch die Wassertheilchen selbst in Bewegung gesetzt und die

---

Faraday'sche Theorie, nach der die Entladungen auf der eigenartigen Polarisation des Dielektricums beruhen, alle Eigenthümlichkeiten der elektrischen Entladung in Gasen, vollständig erklären lasse. (Wiedem. Ann. XXII, S. 305, 1884.)

[1]) Nature XXIV, p. 360, 1881; Beibl. zu Wiedem. Ann. VI, S. 47, 1882; Jahrb. d. Erfind. XVIII, S. 260, 1882.

Bewegungen werden so auf andere in dem Wasser befindliche Körper übertragen. Eine leichte Korkkugel nimmt wegen ihrer Leichtigkeit die Schwingungen stärker auf als das Wasser und entfernt sich von dem pulsirenden Körper, eine schwerere aber wird scheinbar angezogen. Wird neben eine oscillirende Trommel ein Stäbchen von Kork horizontal aufgehängt, so stellt sich dasselbe wie ein magnetischer Körper axial, ein Metallstäbchen aber stellt sich wie ein diamagnetischer Körper äquatorial ein. Endlich hat Bjerknes auch noch die Bewegungen des Wassers sichtbar zu machen gewusst und bewiesen, dass dieselben in der Nähe der pulsirenden Körper den magnetischen Kraftlinien ganz entsprechen. Aehnliche Versuche in Luft führte Aug. Stroh [1]) im nächsten Jahre der Gesellschaft der Telegrapheningenieure in London vor. Er benutzte dabei kleine Holzschalen, deren Mündungen mit elastischen Membranen verschlossen waren, während von der hinteren Seite aus eine biegsame Röhre nach einem Hohlraume führte, in dem eine tönende Pfeife regelmässige Luftschwingungen erzeugte. Die Anziehungen und Abstossungen zeigten sich hier in der Luft wie vorher bei Bjerknes im Wasser. Ein ruhender Körper, die Hand, ein Kartenblatt etc., bewirkten wie ein unmagnetischer Körper immer eine Anziehung; die Drucklinien entsprachen ganz den magnetischen Kraftlinien. B. Élie endlich zeigte im Jahre 1882 [2]) ganz entsprechende Wirkungen an Kugeln, die im Wasser rotirten. Zwei neben einander rotirende Kugeln stossen sich bei gleicher Rotationsrichtung ab und ziehen sich bei entgegengesetzter Richtung an; zwei über einander um eine gemeinsame Achsenlinie rotirende Kugeln verhalten sich umgekehrt.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Dass alle diese Analogien zwischen den Wirkungen undulirender Medien und denen elektrischer Kräfte keinen Ersatz für eine kinetische Theorie der Elektricität geben können, ist an sich klar. Es kann auch kein Zweifel darüber herrschen, dass eine solche Theorie kaum zu allgemeiner Anerkennung gelangen wird, bevor nicht die Gravitation ebenfalls ihre kinetische Erklärung gefunden. Um aber die Wirksamkeit und fermentative Bedeutung solcher Analogien richtig zu würdigen, braucht man doch nur an die folgenreiche Benutzung akustischer Analogien durch Th. Young für die Entwickelung der Undulationstheorie des Lichtes zu denken. Dafür, dass man in der Elektricitätslehre schon allgemeiner misstrauisch gegen die unmittelbare Wirkung in die Ferne geworden und eine kinetische Theorie der Kraft als wünschenswerth und zu erstrebendes Ziel anerkennt, sind die folgenden Worte G. Wiedemann's aus seinem grossen Lehrbuche der Elektricität um so beachtenswerther, als dasselbe in seinen theoretischen Ableitungen noch ganz auf

[1]) Journ. of the Soc. of Telegraph Engineers XI, p. 192, 1882; Jahrb. d. Erfind. XVIII, S. 265, 1882.

[2]) Journ. de Phys. (2) I, p. 71, 1882; Beibl. zu Wiedem. Ann. VI, S. 387, 1882.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

auf die Annahme unvermittelt in die Ferne wirkender elektrischer Flüssigkeiten gegründet ist: „Durch die Betrachtungen von Maxwell und v. Helmholtz sind wir dahin gelangt, die Fortpflanzung der elektrischen und magnetischen Störungen auf Gleichungen zurückzuführen, welche mit denen zweier auf einander senkrechter Lichtschwingungen völlig identisch sind. Es liegt daher nahe, die elektrischen und magnetischen Störungen auf entsprechende Bewegungen des Lichtäthers zu reduciren ... Gelingt es noch weiter, die elektrischen Phänomene auf Bewegungen des Aethers zurückzuführen, so würden dadurch nicht nur zwei grosse Gebiete der Physik zu einem einzigen verschmolzen, sondern wir hätten alle physikalischen Erscheinungen nur allein auf die Bewegungen zweier Arten von Materie, der Molecüle und Atome der Körper und der Aethertheilchen, zurückgeführt“ [1]).

Dabei bleiben als ebenfalls bezeichnend für den Stand der Elektricitätslehre in unserer Zeit immer noch eine Menge einzelner Beobachtungen zu erwähnen, die alle auf eine grosse Abhängigkeit der elektrischen Erscheinungen von den inneren Bewegungen und Zuständen der Materie hindeuten, die aber alle durch den Mangel einer genügenden Kenntniss von der Wechselwirkung zwischen der ponderablen Materie und dem Aether der Erklärung grössere oder geringere Schwierigkeiten bereiten. Hagenbach [2]) zeigte, dass die Entstehung der Reibungselektricität weniger an die besondere Natur der einzelnen Materien, als vielmehr an die Structur und die Oberflächenbeschaffenheit derselben gebunden sei. Glas z. B. wurde durch Reiben mit Katzenfell je nach der Art des Reibens und der Art der Oberfläche ebenso positiv als negativ elektrisch. Papier verhielt

---

[1]) Die Lehre von der Elektricität IV, S. 1203, 1885. In neuester Zeit hat H. Hertz (Professor in Bonn, Wiedem. Ann. XXXI, S. 421 und 543; XXXIV, S. 155, 273, 551 und 607; XXXVI, S. 1 und 769; XXXVII, S. 395) durch einfache und sichere Experimente gefunden, dass die elektrischen Kräfte, wie Faraday angegeben, selbständig im Raume bestehende Polarisationen (des Zwischenmediums) sind, dass die Wirkungen der elektrischen Induction mit endlicher Geschwindigkeit im Raume sich ausbreiten, dass sie dabei der Reflexion wie das Licht und ebenso auch der Interferenz fähig sind. „Unseren letztbeschriebenen Versuchen (sagt er Ann. XXXIV, S. 622) entspricht in der Akustik der Versuch, in welchem man zeigt, dass die Annäherung einer Stimmgabel an eine feste Wand den Ton derselben in gewissen Abständen verstärkt, in anderen schwächt. In der Optik finden unsere Versuche ihr Analogon in der Lloyd'schen Form des Fresnel'schen Spiegelversuchs. In Optik und Akustik gelten jene Versuche als Argumente für die Wellennatur des Lichtes und des Schalles, so werden wir auch die hier beschriebenen Erscheinungen als Argumente für die wellenartige Ausbreitung der Inductionswirkung einer elektrischen Schwingung ansehen dürfen.... Ich habe die Versuche dieses Aufsatzes . . . beschrieben, ohne in wesentlichen Punkten Rücksicht zu nehmen auf eine besondere Theorie. . . . Indessen ist es klar, dass die Versuche ebenso viele Gründe für diejenige Theorie der elektrodynamischen Erscheinungen sind, welche zuerst von Maxwell auf die Faraday'schen Anschauungen aufgebaut wurde.“

[2]) Carl's Repertorium der Physik VIII, S. 65, 1872.

sich je nach dem Material, aus dem es gefertigt, aber auch je nach der Textur, sehr verschieden. Schwarze und weisse Seide stehen in der Spannungsreihe weit aus einander. Auch Metalle werden beim Reiben mit verschiedenen Nichtleitern entgegengesetzt elektrisch. P. Volpicelli[1]) constatirte, dass alle Metalldrähte beim Biegen schwache elektrische Ströme geben. Diese Ströme sind nicht, wenigstens wenn die Biegungen nicht schnell hinter einander wiederholt werden, thermo-elektrischen Ursprungs, denn sie hören direct mit der Biegung auf und wechseln um, wenn dieselbe einmal so erfolgt, dass die Enden der Drähte einander genähert und dann so, dass die Enden von einander entfernt werden. Grössere Schnelligkeit der Biegung vermehrt auch den Biegungsstrom. P. Joulin[2]) behauptete, dass die starke Elektricitätsentwickelung, welche man häufig an den Treibriemen schnell bewegter Maschinenräder beobachtet, nicht sowohl eine Wirkung der eigentlichen Reibung sei, denn die Elektricität entsteht auch, wenn Papier von der Trockentrommel abgewickelt wird, als vielmehr eine Folge der schnellen Aufhebung der Cohärenz zwischen dem Riemen und der Scheibe. Quincke hatte auch im Jahre 1859[3]) entdeckt, dass beim Durchfliessen von Flüssigkeiten durch poröse Wände elektrische Ströme in der Richtung des Fliessens entstehen. Zöllner wies nun im Jahre 1872[4]) nach, dass nicht bloss das Hindurchströmen von Flüssigkeiten durch Capillarröhren sondern überhaupt die Reibung von Flüssigkeiten an festen Körpern immer Elektricität erregt, und gründete auf diese Thatsache und die Annahme von Strömungen im flüssigen Erdkerne eine Theorie des Erdmagnetismus. Jene Strömungserscheinungen sind dann mannichfach angezweifelt[5]), aber im Allgemeinen doch bestätigt worden[6]). Zöllner sprach darauf im Jahre 1876[7]) das Resultat seiner experimentellen Untersuchungen und damit auch die Erklärung der Erscheinungen in den Worten aus: „Bei der gleitenden Reibung zweier Körper entwickeln sich an der Berührungsfläche elektromotorische Kräfte von solcher

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

---

[1]) Compt. rend. LXXIV, p. 44, 1872. Beim Biegen von Kupferdrähten, wo die Ströme am stärksten sind, hatten schon Peltier und A. de la Rive dieselben bemerkt.

[2]) Compt. rend. LXXVI, p. 1299 u. 1478, 1873. J. M. Batchelder hatte 1847 (Silliman's Journ. III, p. 250, 1847) beobachtet, dass ein 35 Fuss langer und 9 Zoll breiter lederner Treibriemen, der zwei hölzerne Trommeln verband und 1600 Fuss in der Minute durchlief, bis auf eine Entfernung von 1 Fuss 5 Zoll elektrische Funken gab. Sehr starke Elektricitätsentwickelung bemerkte auch Holmes an den ledernen Treibriemen einer Garnfabrik in Glasgow, wo sogar die Arbeiter durch besondere Vorrichtungen gegen dieselbe geschützt werden mussten.

[3]) Pogg. Ann. CVII, S. 1, 1859; CX, S. 38, 1860.

[4]) Ber. d. K. Sächs. Ges. der Wissensch. XXIV, S. 317, 1872; Pogg. Ann. CXLVIII, S. 640, 1873.

[5]) So von Beetz, Pogg. Ann. CXLVIII, S. 486, 1873.

[6]) Dorn, Pogg. Ann. CLX, S. 56; H. Haga, Wiedem. Ann. II, S. 326; I. W. Clark, ibid., S. 335.

[7]) Pogg. Ann. CLVIII, S. 497.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Beschaffenheit, dass dieselben unter geeigneten Bedingungen elektrische Ströme erzeugen, welche bestrebt sind, die beiden Körper in entgegengesetzter Richtung zu ihrer relativen Bewegung zu verschieben“ [1]). Damit waren dann nicht bloss die Diaphragmenströme, sondern auch umgekehrt die Fortführungen materieller Theilchen durch elektrische Ströme als das reciproke Phänomen erklärt. Edlund [2]) leitete zwar die ersteren noch tiefer aus seiner Theorie ab, indem er annahm, dass strömende Flüssigkeiten das elektrische Fluidum direct in Bewegung zu setzen und mit sich zu führen vermöchten. Demgegenüber aber betonte Elster [3]), dass freie Flüssigkeitsstrahlen in der Luft keine Elektricität entwickeln. Die erwähnte Mitführung ponderabler Stoffe durch strömende Elektricität hatte Reuss [4]) schon im Jahre 1807 entdeckt, indem er bemerkte, dass eine Flüssigkeit durch eine poröse Wand, welche die erstere in zwei Theile trennt, von einem elektrischen Strome in seiner Richtung mitgerissen wird. Aehnliche Versuche stellte R. Porrett [5]) im Jahre 1816 an. Einen Apparat zur exacteren Beobachtung der Erscheinungen aber construirte erst G. Wiedemann im Jahre 1852 [6]), der dann auch das allgemeine Interesse an diesen Vorgängen kräftig weckte. Indessen waren viele Physiker doch geneigt, die Elektricität als Ursache dieser Fortführungen nicht anzuerkennen und dieselben nur einer durch die Elektricität modificirten Diosmose zuzuschreiben, weil es noch nicht gelungen war, auch ohne Diaphragmen Fortführungen materieller Theilchen durch elektrische Ströme zu Stande zu bringen. Dies letztere leistete Quincke im Jahre 1861 [7]). Derselbe machte die durch die Elektricität hervorgerufenen Strömungen der Flüssigkeiten an den Wänden fester Röhren durch Suspension kleiner Stärkekörner bemerklich und gab dann auch eine überzeugende Erklärung der Erscheinungen. Danach werden die Flüssigkeiten an den Wänden der Röhren durch Contact elektrisch, und je nach der Elektricität werden sie dann von dem positiven oder negativen Strome in seiner Richtung mit fortgezogen; von der Flüssigkeit werden aber auch die in derselben suspendirten Körperchen mit Elektricität geladen und folgen danach ebenfalls mit der Flüssigkeit der Elektricität. „Es ist, so sagt Quincke am Schlusse seiner Arbeit, keine Thatsache bekannt, die der Erklärung der Fortführung materieller Theilchen widerspräche. Wie dem auch sei, jedenfalls folgt

[1]) Pogg. Ann. CLVIII, S. 498.

[2]) Wiedem. Ann. I, S. 161.

[3]) Ibid. VI, S. 553.

[4]) Mém. de la soc. imp. des nat. à Mosc. II, p. 327, 1809; nach Wiedemann, Elektricität II, 166 u. 181. Ferd. Friedr. Reuss, 1788—1852, Prof. in Moskau.

[5]) Gilb. Ann. LXVI, S. 272.

[6]) Pogg. Ann. LXXXVII, S. 321, 1852; weitere zahlreiche Beobachtungen ibid. XCIX, S. 177, 1856. Ueber die mit diesen Erscheinungen wohl in gewissen Beziehungen stehende Wanderung der Jonen hat W. Hittorf ebenfalls im Jahre 1856 eine grössere Arbeit veröffentlicht (ibid. XCVIII, S. 1).

[7]) Pogg. Ann CXIII, S. 513, 1861.

aus den besprochenen Versuchen, dass die Bewegung materieller Theilchen unter dem Einflusse der strömenden Elektricität ihrer Grösse und Richtung nach nicht abhängt von dem Aggregatzustande derselben, sondern von der Natur der Theilchen und der Natur der Stoffe, die mit denselben in Berührung treten"[1]. Nach denselben Principien hat dann v. Helmholtz im Jahre 1879[2] eine Theorie dieser Convection mathematisch durchgeführt. Damit aber war auch hier wieder eine Untersuchung der directen Einwirkung von dem Aether auf die ponderable Materie glücklich umgangen, denn nun wirkte ja die freie Elektricität nicht auf die ponderable Materie der Flüssigkeiten, sondern nur auf die in denselben enthaltene und an dieselben gebundene Elektricität. Eine Verlängerung der Metalldrähte durch die in ihnen fliessenden Ströme glaubte Edlund[3] auch unabhängig von der mittelbar durch die erzeugte Wärme bewirkten Volumenvergrösserung nachgewiesen zu haben, indem er constatirte, dass ein Draht sich stärker verlängert, wenn er durch den elektrischen Strom, als wenn er durch erwärmtes Wasser auf eine gewisse höhere Temperatur gebracht wird. Versuche anderer Physiker aber liessen doch als möglich erscheinen, dass die beobachteten Verlängerungen immer nur mittelbare Wirkungen der Temperatur sind, und dass die verschiedenen Resultate bei der Erwärmung durch den Strom oder durch umgebende Flüssigkeiten nur auf eine verschiedene Vertheilung der Wärme im Inneren zurückgeführt werden müssen[4].

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Alle die vielfältigen Beobachtungen über die Zusammenhänge zwischen elektrischen Erscheinungen und Molecularveränderungen der ponderablen Körper liessen darauf schliessen, dass jede Veränderung der elektrischen Zustände der Körper auch Bewegungen und Neuordnungen ihrer Molecüle zur Folge hat, und dass umgekehrt alle Umsetzungen von Molecularbewegungen auch elektrische Wirkungen nach sich ziehen. Diese allgemeineren Vorstellungen von der Erregung der Elektricität aber riefen auch wieder Zweifel darüber hervor, ob wirklich die chemische Theorie der galvanischen Ströme die einzig mögliche sei, oder ob man nicht die beim Contact heterogener Stoffe entstehende Elektricität in erster Linie auch auf andere Ursachen, vor Allem auf die thermische Differenz der sich berührenden Stoffe zurückführen dürfe. Danach könnte man den Ausgleich der Wärmebewegungen bei dem Contact verschiedener Stoffe als die Ursache der Molecularveränderungen ansehen, welche die elektrischen Erscheinungen bedingen; die erregte Elektricität dürfte dann erst die chemi-

---

[1] Pogg. Ann. CXIII, S. 598.

[2] Wiedem. Ann. VII, S. 351, 1879.

[3] Pogg. Ann. CXXIX, S. 15, 1866; CXXXI, S. 337, 1867.

[4] So Exner (Pogg. Ann., Erg. VII, S. 431), R. Blondlot (Compt. rend. LXXXVII, p. 206) u. A. Edlund aber vertheidigte 1876 (Pogg. Ann. CLVIII, S. 148) wieder seine Ansicht gegen alle Einwürfe.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

schen Veränderungen der Körper hervorrufen, welche unter geeigneten Umständen wieder rückwärts die Wärme liefern, die zur Erzeugung fortdauernder elektrischer Ströme nöthig wäre. Wirklich sind gerade nach dieser Richtung hin Theorien der galvanischen Ströme mit vielem Eifer vertheidigt worden. G. Gore [1]) kam durch vielfältige Versuche zu der Ansicht, dass die elektrische Erregung zwischen Flüssigkeiten und Metallen nicht sowohl von der chemischen als vielmehr von der thermischen Differenz abhängig sei. Bouty [2]) zeigte, eben dahin zielend, dass zwei gleiche Metallplatten in einer Flüssigkeit, deren Theile verschiedene Temperatur haben, elektromotorische Kräfte entwickeln. Hoorweg endlich kommt durch ausgedehnte Betrachtungen direct zu den Sätzen: „Alle Volta'schen Ströme sind Thermoströme; die chemische Wirkung in der Säule und den Zersetzungsapparaten ist eine Folge des galvanischen Stromes" [3]). Und ganz allgemein sagt er bald danach: „Die Elektricität durch Reibung und Druck hat denselben thermischen Ursprung, wie die der galvanischen Säule, d. h. die Nachbarmolecüle zweier heterogenen Körper wirken bei ihrer thermischen Bewegung störend auf einander ein; hierbei geht einige thermische Energie verloren, und eine äquivalente Quantität elektrischer Energie kommt zum Vorschein .... [4]) Diese Ursache ist auch vollkommen genügend zur Erklärung aller Elektricitätsentwickelung. Weder Verdampfung noch Lösung oder Erstarrung, weder Zertheilung noch Zermalmung, weder Osmose noch Capillarität, weder Verbrennung noch eine andere chemische Action braucht als Elektricitätsquelle betrachtet zu werden" [5]).

Gehen wir schliesslich zur Schilderung der Entwickelung der elektrischen Technik über, so dürfen wir hier wohl etwas breiter werden, als wir sonst bei Erwähnung der technischen Zweige der Wissenschaft geworden sind; einestheils darum, weil der technische Zweig, der erst vor Kurzem seine Abtrennung vom theoretischen unternommen hat, hier noch mehr und näher mit demselben zusammenhängt, als anderswo in der Physik, anderentheils aber auch darum, weil die Elektrotechnik eine von den übrigen Zweigen der Technik ganz verschiedene, eigenartige Stellung beansprucht.

Wer das Wort Elektrotechnik zuerst gebraucht und wann das geschehen, wird schwer festzustellen sein. Karmarsch in seiner Geschichte der Technologie von 1872 hat dasselbe noch nicht, und in den Lexika, die bis 1880 erschienen sind, wird man vergebens danach

---

[1]) Proc. of the Roy. Soc. XXVII, p. 272, 1878; XXIX, p. 472, 1879.
[2]) Compt. rend. LXXXIX, p. 146, 1879; XC, p. 917, 1880.
[3]) Wiedem. Ann. IX, S. 578, 1880.
[4]) Ibid. XI, S. 144.
[5]) Ibid. XI, S. 150.

suchen. Jedenfalls ist die erste elektrische Ausstellung in Paris vom Jahre 1881 mit dem Elektrikercongress Taufpathe bei der Namengebung gewesen. Das Wort ist auch nicht ganz leicht zu definiren und seinem Sinne nach zu erschöpfen, denn es bezeichnet nicht, was man dem Aeusseren nach vermuthen sollte, nur einen besonderen Zweig der Technik, sondern will vielmehr, seinem neuesten Anspruche nach, die gesammte Technik umfassen, insofern wenigstens, als die Elektricität überall leitend und umformend als ehrlicher Makler im Spiele der Kräfte auftreten soll. Dass die Elektricität zu einer solchen vermittelnden, Bewegung, Arbeit und Kräfte verwandelnden Thätigkeit wohl geeignet ist, lässt sich nicht mehr leugnen. Sie ist directer, als ihre grosse Concurrentin, die Wärme, in alle physikalischen Kräfte umsetzbar und lässt sich leicht in beliebig weite Entfernungen auf beliebigem Wege übertragen. Indessen hängt die Existenz einer Elektrotechnik in dem angedeuteten allgemeinen Sinne nicht bloss hiervon, sondern fast noch mehr davon ab, ob die nothwendige Voraussetzung aller Elektrotechnik, die Elektricität selbst, überall und zu jeder Zeit in genügender Stärke und schliesslich auch zu einem angemessenen Preise zu haben ist. Nach beiden Seiten hin zeigten sich die zuerst entdeckten Elektricitätsquellen für das allgemeine Problem der Kraftübertragung unbrauchbar. Die Volta'sche Säule und alle Becher- und Trogapparate nahmen vom Augenblicke ihrer Zusammensetzung an in ihren Wirkungen so gewaltig ab, dass sie selbst eine wissenschaftliche Benutzung für kurze Zeit recht unbequem und schwierig machten. Die sogenannten constanten Elemente, welche seit den dreissiger Jahren construirt wurden, zeigten sich trotz ihres Namens, wenigstens wenn stärkere Wirkungen von ihnen verlangt wurden, doch so wenig nachhaltig, dass ein neuerer Autor das Vorwort seines Werkes über die galvanischen Batterien mit den Worten beginnen muss[1]): „Die galvanischen Batterien! ein leises Lächeln umspielt den Mund des Elektrotechnikers von heute, wenn von diesen Stromquellen die Rede ist, sie scheinen ihm überwundene Kinderkrankheiten der angewendeten Elektricität zu sein." Trotzdem sind diese galvanischen Elemente für einzelne Zweige der Technik, in denen nur schwache Ströme benutzt werden, oder bei denen die Kraftübertragung nicht Mittel zum Zwecke, sondern eigenstes Ziel ist, von ausreichender Wirkung. Für die elektrische Telegraphie, das elektrische Signalwesen, die elektrischen Registrirapparate liefern die viel gebrauchten Elemente, das Meidinger'sche vom Jahre 1859[2]), oder das ebenso verbreitete Braunsteinelement, welches Leclanché[3]) um die Mitte der sechziger Jahre construirte, länger als ein

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

[1]) Hartleben's elektro-techn. Bibliothek, IV. Bd.: Die galvanischen Elemente, S. VII.

[2]) H. Meidinger, eine völlig constante Batterie, Pogg. Ann. CVIII, S. 602, 1859.

[3]) Georges Leclanché, 1839—1882, Chemiker in Paris.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Jahr andauerde genügend constante und genügend starke Ströme zu einem angemessenen Preise. Diese Zweige der Elektrotechnik, denen wir auch die Galvanoplastik anschliessen, haben sich darum unabhängig von dem allgemeinen elektrotechnischen Problem und theilweise lange vor dem bewussten Erfassen desselben schon zu grosser Vollkommenheit entwickeln können und ihre Entwickelung ist auch schon angedeutet worden. Diesen älteren Zweigen haben sich dann in unserer letzten Periode der Physik noch einige neue angefügt, die durch die Construction der Telephone hervorgerufen wurden und die wir, soweit sie in engster Abhängigkeit von der theoretischen Wissenschaft geblieben sind, kurz kennzeichnen wollen.

Die ersten Versuche zu einer Umwandlung der Elektricität in Töne machte Page[1]) im Jahre 1837, indem er zwischen den Schenkeln eines Hufeisenmagneten eine Kupferdrahtspirale aufhängte. Der Magnet fing an zu tönen, wenn der galvanische Strom, welcher durch die Spirale hindurchging, geöffnet oder geschlossen wurde. Wertheim[2]), der 1846 jenen Ton als den Longitudinalton des Magneten erkannte, erklärte die Entstehung desselben aus Verlängerungen und Verkürzungen, welche durch das Magnetisiren hervorgebracht würden. Ausser dem Longitudinaltone und dem meist sehr schwachen Quertone, welcher den ersteren oft begleitet, bemerkte Wertheim aber noch ein ganz „eigenthümliches, anscheinend den Draht entlang laufendes Geklirr, sowie andere Arten von schwer bestimmbaren Geräuschen, und diese entstehen besonders, sowie die Unterbrechungen und folglich die Stösse rascher auf einander folgen“. Diesen Klirrton benutzte nun um das Jahr 1860 Ph. Reis[3]) zur Construction seines Telephons. Der Sprechapparat war weiter nichts, als der auf einen Resonanzboden gesetzte, von der Stromspirale umwundene Eisenstab (eine Stricknadel). Der Aufnahmeapparat bestand aus einer gespannten Membran, welche die Töne aufnahm und bei jeder Tonschwingung den nach dem Sprechapparate gehenden Strom einmal schloss und wieder unterbrach. Die Leistungen des Apparates, welchen Reis im December 1861 im physikalischen Vereine zu Frankfurt zeigte, charakterisirt er selbst im Jahresberichte dieses Vereins mit den Worten: „Was nun die Leistungen des Telephons anbelangt, so sei bemerkt, dass ich damit im Stande war, den Mitgliedern einer zahlreichen Versammlung (des physikalischen Vereins zu Frankfurt a. M.) Melodien hörbar zu machen, welche in einem an-

---

[1]) Charles Page (1812 — 1868, Agent und Patentanwalt in Washington), Pogg. Ann. XLIII, S. 411, 1838.

[2]) Pogg. Ann. LXXVII, S. 43, 1849. Wertheim gebrauchte bei seinen Versuchen einen Stab von weichem Eisen, den er von der Stromspirale umgeben liess. Um dieselbe Zeit beschäftigten sich noch mehrere Physiker, wie Delezenne, Marrian, Beatson, Wartmann, de la Rive mit demselben Problem und kamen meist zu den gleichen Resultaten wie Wertheim.

[3]) Philipp Reis, 7. Jan. 1834 Gelnhausen — 14. Jan. 1874 Friedrichsdorf, Lehrer am Garnier'schen Institute in Friedrichsdorf b. Hamburg.

deren Hause (ca. 100 m entfernt) bei geschlossenen Thüren nicht sehr laut in den Apparat hineingesungen wurden. Andere Versuche ergaben, dass der tönende Stab im Stande ist, vollständige Dreiklänge eines Claviers, auf dem das Telephon steht, zu reproduciren, und dass endlich dasselbe sogar die Töne anderer Instrumente, Harmonika, Clarinette, Horn, Orgelpfeifen u. s. w. wiedergiebt, vorausgesetzt, dass die Töne einer gewissen Lage von F bis $\overline{\overline{F}}$ circa angehören. . . . Es war bis jetzt nicht möglich, die Tonsprache der Menschen mit einer für Jeden hinreichenden Deutlichkeit wiederzugeben. Die Consonanten wurden grösstentheils ziemlich deutlich reproducirt, aber die Vocale noch nicht im gleichen Grade" [1]). Die Ursache dieser Unvollkommenheit lag wohl in dem Sprechapparate des Instrumentes, dessen Eisenstab die feinen Modificationen der Schwingungen nicht wiederzugeben vermochte. Reis hat darum, wie das Telegraphensecretär Legat 1863 [2]) beschreibt, seinen Sprechapparat ganz principiell abgeändert und die Töne durch die Schläge eines vor einem Elektromagneten pendelartig aufgehängten Ankers wiedergeben lassen. Dr. Messel, ein ehemaliger Schüler von Reis, bezeugt, dass dieser Apparat auch die Worte besser als der erste wiedergegeben habe, ohne doch volle Deutlichkeit zu geben. Es wird vielfach behauptet, dass danach das Telephon ganz in Vergessenheit gerathen sei. In dieser Strenge ist das jedenfalls nicht wahr; in manchen Lehrbüchern und vielen Lehrvorträgen ist der Apparat vielmehr immer als ein sehr interessantes Beispiel für die vielfältige Uebertragbarkeit der Elektricität angegeben worden, nur seine praktische Nutzbarkeit hat man nicht zu erkennen vermocht, und das war bei seiner Unvollkommenheit auch einigermaassen zu entschuldigen.

Von der fortdauernden Beachtung des Apparates durch die Physiker zeugen jedenfalls die fortdauernden Verbesserungsversuche. Im November 1865 experimentirte S. Yates vor der Dubliner Philosophical Society mit einem dem letzten Reis'schen Telephon ähnlichen Apparate, der Worte noch etwas deutlicher als der letztere wiedergab. Cromwell Varley in London benutzte 1870 für die Uebertragung von Tönen das Vibriren von Metallzungen, Paul Lacour in Kopenhagen in ähnlicher Weise Stimmgabeln. Elisha Gray in Chicago construirte 1874 einen Aufnahmeapparat, bei welchem in der Mitte der schwingenden Membran, die die gesprochenen Laute annahm, ein Metallstift befestigt war, dem in einer schlecht leitenden Flüssigkeit ein anderer Metallstift gegenüberstand. Als Sprechapparat diente eine Platte, die von einem Elektromagneten angezogen wurde. Im Jahre 1876 aber, wo Gray ein Patent nachsuchte, erhielt noch vorher Graham Bell [3]) ein solches auf sein

---

[1]) Jahresber. d. phys. Vereins zu Frankfurt 1860/61, S. 62. Der Aufsatz von Reis führt den Titel: „Ueber Telephonie durch den galvanischen Strom" (S. 57).

[2]) Dingl. polyt. Journ. CLXIX, S. 23, 1863.

[3]) Graham Bell, damals Taubstummenlehrer in Boston.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Telephon, das aus zwei ganz gleichen Apparaten bestand, die in der Idee dem Sprechapparate von Gray gleich waren.

Wir können der weiteren Entwickelung der Telephonie, die bald sehr in die Breite ging, nicht nachgehen und wenden uns zur Betrachtung weiterer Apparate, deren Entwickelung an die des Telephons anknüpfte. Nachdem Edison [1]) schon versucht hatte, wieder mit Zuhülfenahme einer galvanischen Batterie das Telephon zur Uebertragung leiserer Töne auf weitere Entfernung geeignet zu machen, kam David Edwin Hughes [2]) aus Louisville im Jahre 1878 mit Benutzung des Edison'schen Gedankens zur Erfindung des Mikrophons. Jede Schwankung in der Stärke eines elektrischen Stromes, die man an einer Stelle der Stromleitung durch Vergrösserung des Widerstandes erzeugt, pflanzt sich durch die Kraft des Stromes selbst in dem ganzen Stromkreise fort. Vermag man also an einer Stelle des Stromes den Schwingungen von Tönen ganz entsprechende Stromschwankungen zu erzeugen, so werden diese durch den Strom selbst bis zum Sprechapparate fortgepflanzt und dort in unveränderter Stärke hörbar. „Die Aufgabe besteht also, wie Hughes selbst sagt, darin, in den Schliessungsbogen eines elektrischen Stromes einen Widerstand einzuschieben, der sich ändert in genauer Uebereinstimmung mit Schallschwingungen, so dass ein undulirender elektrischer Strom entsteht, dessen Undulationen nach Wellenlänge, Höhe und Form ein genaues Abbild der Schallschwingungen sind.“ Edison war nahe an der Lösung dieses Problems gewesen, aber auch Hughes fand erst nach verfehlten Versuchen die so einfache Lösung. Wie Preece (Versammlung des englischen Telegrapheningenieur-Vereins am 23. Mai 1878) erzählt, soll Hughes bemüht gewesen sein, die Stromschwankungen durch Verlängerung und Verkürzung des Leitungsdrahtes selbst zu erzeugen, jedoch ohne Erfolg. Als ihm aber zufällig der Leitungsdraht riss und er die Drahtenden lose wieder zusammenlegte, bemerkte er, dass Geräusche in der Nähe wirklich im Telephon hörbar wurden. Er erinnerte sich danach wohl der lauten Geräusche, mit welchen einzelne lose befestigte Gegenstände, wie Fensterscheiben etc., auf Töne reagiren, und kam dadurch auf den ganz neuen Gedanken, die zu telephonirenden Töne vor der Uebertragung erst noch durch Resonanz zu verstärken. Er legte zwei Drahtstifte, an denen die Leitungsdrähte einer galvanischen Batterie befestigt waren, auf einen Resonanzboden in einem Abstande von 1 mm parallel neben einander und verband diese leitend durch einen quer darüber, lose aufgelegten, den vorigen gleichen Drahtstift. Oder besser, er befestigte in einer auf dem Resonanzboden stehenden senkrechten Wand zwei kleine Scheiben von Retortenkohle, in welchen die Leitungsdrähte der Batterie endigten, und stellte zwischen diese einen

[1]) Thomas Aloa Edison, geb. am 10. Febr. 1847, zuerst Telegraphenbeamter.

[2]) D. E. Hughes, geb. 1831 in London, Erfinder des Typendrucktelegraphen.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Stift aus Retortenkohle so, dass dieser nur lose mit den beiden Scheiben in Verbindung stand. Dann wurden nicht nur Töne und Worte, die man gegen den Resonanzboden sprach, sondern auch so leise Geräusche, wie sie das Bestreichen des Resonanzbodens mit einem Haarpinsel, oder das Laufen einer Fliege über denselben erzeugt, laut und deutlich durch das Bell'sche Telephon, das ganz in alter Einrichtung als Sprechapparat benutzt wurde, wiedergegeben. Gleichzeitig mit Hughes war Rob. Lüdtge in Berlin zur Construction eines Mikrophons gekommen und hatte auch schon im Januar 1878 ein Patent auf dasselbe genommen. In seiner Patentbeschreibung giebt er seinen Apparat ganz dem von Hughes entsprechend an: „Wenn man im Stromkreise einer Batterie eine Unterbrechungsstelle hervorbringt, etwa durch einfaches Zerschneiden des Leitungsdrahtes, und die beiden Schnittflächen gegen einander legt, so ist freilich der Strom wieder geschlossen; jedoch findet an der Schnittstelle ein Uebergangswiderstand statt, der um so geringer wird, je stärker man die beiden Schnittflächen an einander drückt. — Construirt man die eine Schnittfläche nun so, dass sie durch Sprechen oder andere Geräusche in Schallschwingungen versetzt wird, so wird sie gegen die andere berührende Schnittfläche verschieden drücken, je nach der Intensität und Form der einzelnen Schwingung. Der Uebergangswiderstand an dieser Stelle wird genau durch Intensität, Form und Anzahl der Schallschwingungen in seiner Grösse beeinflusst und bestimmt, mithin auch die Intensität des elektrischen Stromes . . . und ein in den Stromkreis eingefügtes Bell'sches Telephon wird die der Amplitude der Schallschwingung entsprechende Vergrösserung der Intensität des Stromes wieder in die entsprechende Schallwirkung übersetzen“ u. s. w.

Da jede Widerstandsänderung im Stromkreise durch Stromschwankungen und damit in einem eingeschalteten Telephon als Schall sich bemerkbar macht, so hat man das Telephon benutzt, um die Widerstände von Stromleitern durch dasselbe zu messen oder wenigstens zu vergleichen, und da der Widerstand auch durch den Druck geändert wird, den man auf geeignete Theile des Stromkreises ausübt, so kann man auch aus den Schwankungen der Stromstärke auf Schwankungen des Druckes schliessen, die auf gewisse empfindliche Theile des Stromkreises geübt werden. Edison hat zu dem Zwecke ein Mikro-Tasimeter construirt (in welchem er aber statt des Telephons ein Thomson'sches Spiegelgalvanometer zur Bestimmung der Stromstärke benutzte), mit dem er Schwankungen des Luftdruckes von $^1/_{1\,000\,000}$ Zoll engl. gemessen haben will. Das Instrument ist auch als Thermometer zu gebrauchen, indem die Wärme ebenso wie der Druck den Widerstand und damit die Stromstärke ändert; nach Edison ist es als solches sogar noch empfindlicher als die Melloni'sche Thermosäule, und er empfiehlt dasselbe den Schiffern als ein Mittel, die Annäherung der Eisberge, durch ihre Kälteausstrahlung, lange vor ihrem Sichtbarwerden zu erkennen.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Denken wir uns weiter auf zwei Hohlcylinder von Holz je zwei Inductionsspulen, eine obere und eine untere, so aufgewickelt, dass alle inducirenden Wirkungen eines Stromkreises, in den die oberen Spulen eingeschaltet sind, auf einen Leitungskreis, in welchen die unteren Spulen eingeschaltet sind, sich vollständig aufheben, und denken wir uns noch in den Stromkreis der oberen Rollen ein Mikrophon mit einer immerfort tickenden Uhr, in den unteren Leiterkreis ein Telephon eingeschaltet, so wird das Telephon unter so gekennzeichneten normalen Umständen sich schweigend verhalten. Aendert man aber die Verhältnisse in dem einen Holzbecher dadurch ab, dass man in denselben oder in seine Nähe ein Metall bringt, so zeigt sich die Störung des elektrischen Gleichgewichtes sogleich durch Töne im Telephon an. Auf solche verbundene Inductionsrollen, die unter normalen Verhältnissen ihre Inductionswirkung ausgleichen, aber jede kleine Veränderung der inducirenden Kräfte in der einen Rolle durch einen Inductionsstrom anzeigen, hatten schon Babbage und John Herschel aufmerksam gemacht, und Dove hatte auch ein solches Instrument unter dem Namen „Differential-Inductor" wirklich construiren lassen. Die geringe Empfindlichkeit der damals vorhandenen Galvanometer hatte aber die weitere Anwendung des Instrumentes verhindert, und erst in dem Telephon fand Hughes das Mittel, die schwachen, hier entstehenden Inductionsströme hörbar zu machen. Das Instrument, das er Inductionswage nannte [1]), ist so empfindlich, dass es zu tönen anfängt, wenn in die Becher nur zwei Goldstücke von nicht ganz gleichem Gewicht oder ganz gleichem Gehalt geworfen werden. Der Apparat wird empfohlen für die Aufsuchung von Erzlagern unter der Erde, auch der Metallmassen auf dem Meeresboden, und mit einem ähnlichen Apparate soll auch die Kugel im Körper des verwundeten Präsidenten Garfield aufgefunden worden sein.

Da das Telephon die geringsten Stromschwankungen hörbar macht und Stromschwankungen auch durch Wärme und Licht zu erzielen sind, so lag der Versuch nahe, ohne jeden Leitungsdraht, nur durch Licht- und Wärmestrahlen zu telephoniren. Als günstigstes Medium, die Licht- und Wärmestrahlen in Stromschwankungen umzuwandeln, zeigte sich das Selen. Dieses 1817 von Berzelius entdeckte Element hielt man anfangs für einen Nichtleiter der Elektricität. Knox erkannte 1837, dass es zu einem Leiter wird, wenn es schmilzt; Hittorf zeigte 1851, dass es in einer seiner allotropischen Modificationen, nämlich in der krystallinischen, auch bei gewöhnlicher Temperatur leitend ist [2]). Wenn geschmolzenes Selen rasch erkaltet, nimmt es eine glasartige Beschaffenheit an, es ist im reflectirten Lichte fast schwarz, in dünnen Lamellen durchscheinend rubinroth. Bei langsamer Abkühlung dagegen ist es selbst in dünnen Lamellen undurchlässig für Licht,

---

[1]) Nature XIX, p. 77, 1879: An induction-currents balance.

[2]) Pogg. Ann. LXXXIV, S. 219, 1851.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

hat eine körnige oder krystallinische Structur und fast metallisches Ansehen. In dieser letzteren Form nun ist es auch bei gewöhnlicher Temperatur leitend. Die erste Anwendung von dem Selen in der Elektrotechnik machte 1873 der Elektriker Willoughby Smith in London, indem er dasselbe seines grossen elektrischen Widerstandes wegen zur Prüfung der unterseeischen Telegraphenkabel gebrauchte. Sein Gehülfe May entdeckte dabei, dass der Widerstand des Selens im Lichte geringer war als im Dunkeln; das Licht eines Magnesiumdrahtes brachte den Widerstand auf die Hälfte herab[1]). Diese Entdeckung wurde von vielen Physikern, wie Sale, Draper, Adams, Sabine, Werner Siemens[2]) u. A., bestätigt. W. G. Adams fand, dass das Selen sogar für das kalte Mondlicht empfindlich war[3]). Bis dahin waren die Experimente mit Hülfe von Galvanometern ausgeführt worden. Als Bell dann versuchte, die Widerstandsveränderungen mit Hülfe des Telephons zu bestimmen, brachte ihn das umgekehrt auf den Gedanken, diese Eigenschaft des Selens in den Dienst der Telephonie zu stellen. Nach vielen vergeblichen Versuchen gelang es ihm auch, mit Hülfe seines Freundes Sumner Taiter, der äusserst empfindliche Selenzellen zu präpariren wusste, ein Photophon herzustellen, das er am 27. August 1880 in der Versammlung der Amerikanischen Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften zum ersten Male beschrieb[4]). In der besten und einfachsten Form besteht der Aufnahmeapparat desselben aus einem ebenen Spiegel eines biegsamen Materials, z. B. aus versilbertem Glimmer, gegen dessen Hinterseite die Stimme des Sprechenden gerichtet wird. Concentrirt man dann ein starkes Bündel Sonnenlicht mittelst einer Linse auf diesen Diaphragmaspiegel, so wird das von demselben reflectirte Licht in Schwingungen versetzt, welche denen des Diaphragmas selbst entsprechen. Dieses intermittirende, nach der Reflexion mittelst einer Linse wieder parallel gemachte Licht wird auf der entfernten Station auf einem parabolischen Reflector aufgefangen, in dessen Brennpunkt sich eine empfindliche Selenzelle befindet, die mit einem Localkreise aus Batterie und Telephon verbunden ist. Eine grosse Zahl von Versuchen wurden mit übertragenden und empfangenden Instrumenten gemacht, die so weit von einander entfernt waren, dass die

---

[1]) Pogg. Ann. CL, S. 333.

[2]) Ibid. CLIX, S. 117.

[3]) Ibid., S. 622.

[4]) Das Photophon, von A. G. Bell, aus dem Englischen, Leipzig 1880; Jahrb. d. Erfind. XVII, S. 90, 1881. Steinheil hatte schon 1838 in einem vor der Kgl. Bayer. Akademie der Wissenschaften gehaltenen Vortrage gesagt: „Eine fernere Möglichkeit, momentane Bewegungen ohne verbindende künstliche Leitung auf grosse Entfernungen hervor zu bringen, ist durch die strahlende Wärme gegeben, wenn sie, durch Sammelspiegel auf Thermomultiplicatoren geleitet, galvanische Ströme erregt, die ihrerseits wieder magnetische Ablenkungen hervorrufen.“ (Ueber Telegraphie, insbesondere durch galvanische Kräfte, München 1838, S. 10; nach Jahrb. d. Erfind. XVII, S. 136.)

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Töne direct durch die Luft nicht gehört werden konnten, so z. B. in einem Abstande von 213 m. Durch solche Versuche wurde gefunden, dass die articulirte Sprache durch Oxyhydrogenlicht und sogar durch das Licht einer Petroleumlampe wiedergegeben werden kann. Um die Natur der Strahlen festzustellen, welche das Selen afficiren, brachte Bell in die Bahn eines intermittirenden Lichtbündels verschiedene absorbirende Substanzen. Bei einer Lösung von Alaun oder Schwefelkohlenstoff wurde die Stärke des vom intermittirenden Bündel erzeugten Schalles sehr wenig vermindert; aber eine Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff schnitt die meiste, wenn nicht alle Gehörswirkung ab, wohingegen eine scheinbar undurchsichtige Platte von hartem Gummi dies nie ganz vermochte. Obwohl also Wirkungen, so sagt Bell, hervorgebracht werden durch Formen strahlender Energie, die unsichtbar sind, haben wir den Apparat zur Erzeugung und Wiedergabe von Tönen nach dieser Methode „Photophon“ genannt, weil ein gewöhnlicher Lichtstrahl die Strahlen enthält, die wirksam sind. Es kam uns ferner der Gedanke, so erzählt Bell weiter, dass die Molecularstörung, die im krystallinischen Selen durch die Wirkung eines intermittirenden Lichtbündels hervorgebracht wird, bloss durch das Ohr ohne Telephon und Batterie hörbar sein könnte. Viele Versuche wurden gemacht, aber ohne definitive Resultate. Das abnorme Verhalten des Schirmes von hartem Gummi brachte uns auf den Gedanken, diesen zu behorchen. Dieser Versuch hatte einen ausserordentlichen Erfolg. Ich hielt die Platte ganz nahe an mein Ohr, während ein Bündel intermittirenden Lichtes auf dieselbe mittelst einer Linse concentrirt wurde. Eine deutliche musikalische Note wurde sofort gehört. Wir fanden die Wirkung verstärkt, wenn wir die Platte von Hartgummi als Diaphragma arrangirten und durch ein Hörrohr horchten.

Dieser letztere Gedanke gab noch weitere Anregungen. Bell und Tainter constatirten, dass durch intermittirende Licht- oder besser Wärmestrahlen alle festen Körper fast ohne Ausnahme zum Tönen gebracht werden können. Flüssigkeiten bewiesen sich nur in sehr beschränkter Zahl als tönend, Gase und Dämpfe dagegen[1]) (vor Allem athermane) liessen sich leicht durch intermittirende Lichtstrahlen zum Tönen veranlassen. E. Mercadier schlug für solche Uebertragungen von Tönen den Namen Thermo- oder noch allgemeiner Radiophonie vor. Bell, der diesen Namen acceptirte, bemühte sich dann noch weiter, die directe Anwendungsfähigkeit dieser Radiophonie zur Lösung kosmischer Probleme nachzuweisen. Im Herbste 1880 stellte er in Meudon Versuche mit dem Astronomen Jansen an, um die Geräusche, welche durch die grossen Umwälzungen in der Photosphäre der Sonne vermuthlich im Photophon erzeugt werden, direct zu beobachten, vor der Hand indessen ohne Erfolg. Noch weniger freilich ist von einem solchen

---

[1]) W. C. Röntgen, Wiedem. Ann. XII, S. 155, 1881; Tyndall, Nature XXIII, p. 374, 1880—1881.

in Betreff der Projecte zu berichten, die gemacht wurden, um die Bilder einer Camera obscura mit Hülfe von galvanischen Strömen und vermittelst der Selenplatten direct auf beliebige Entfernungen zu übertragen.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1870.

Gehen wir nach diesen Excursionen zu dem Centralproblem der Elektrotechnik, dem der allgemeinen Kräfteübertragung und Kräftetransformation zurück.

Mit Ausschliessung der galvanischen Elemente ist von dem Problem der Kraftübertragung auch die directe Benutzung chemischer Kräfte für die Erzeugung von Elektricität ausgeschlossen; es kommen also für diese vor der Hand nur noch Wärme und mechanische Kraft in Betracht. An Plänen für die Benutzung der Wärme hat es auch nicht gefehlt. Bis in die neueste Zeit ist man eifrig bemüht gewesen, aus den verschiedensten Metallen und Erzen Thermosäulen zusammenzustellen, welche constante und starke Ströme liefern; Markus, Becquerel, Mure und Clamond, Noë u. A. haben in dieser Beziehung bemerkenswerthe Erfolge gehabt. Man hat auch darauf hingewiesen, dass solche Säulen vielleicht die schon lange gesuchten Kraftmaschinen für das Kleingewerbe liefern könnten; bis jetzt aber haben sich diese Thermosäulen zur Erzeugung genügend starker Ströme doch noch als ungenügend gezeigt. Danach bleibt für die Kraftübertragung nur die Erzeugung der Elektricität durch mechanische Kräfte, oder, was dasselbe bedeutet, die Entwickelung der Elektricität durch Inductionsmaschinen. Die kräftigsten dieser Maschinen, wie sie bis in die siebziger Jahre vor Allem zur Erzeugung des elektrischen Lichtes gebraucht wurden, zeigten immer noch zwei Uebelstände, die ihre Anwendung auf enge Gebiete begrenzten. Einestheils war der Vermehrung der angewandten magnetischen Magazine und damit der Stärke des zu benutzenden Magnetismus doch ein ziemlich enges Ziel gesetzt, und anderntheils ermangelten auch die elektrischen Ströme, welche diese Maschinen lieferten, nothwendig der Gleichmässigkeit, weil sie sich aus Inductionsstössen zusammensetzten, die mit der Annäherung der Pole der Elektromagneten an die der festen Magnete bis zu einem Maximum anwuchsen, um dann wieder bis zu einem Minimum abzunehmen. Der erstere Uebelstand ist principiell der wichtigere, weil er auf der Einschiebung des Magnetismus in das Problem der elektrischen Kraftübertragung beruht; ihn beseitigt zu haben ist unstreitig das Verdienst Werner Siemens'[1]). Wilde in Manchester führte im April 1866 eine elektromagnetische Maschine in der alten Art aus, bei welcher er nur die festen permanenten Magnete durch einen viel kräftiger wirkenden Elektromagneten ersetzte. Dieser Elektromagnet erhielt seinen Magnetismus von einer zweiten kleineren

---

[1]) Ernst Werner Siemens, geb. am 13. Dec. 1816 in Lenthe bei Hannover, Bruder von Wilhelm Siemens, seit 1838 Artillerieofficier, gründete um das Jahr 1850 mit Halske die berühmte Telegraphenbauanstalt in Berlin.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

magnetoelektrischen Maschine, bei der natürlich doch wieder permanente Magnete verwandt werden mussten. Siemens zeigte nun noch im Jahre 1866 durch eine neue Maschine, dass man dieselben Effecte noch einfacher erreichen könne. Er liess die kleinere magnetoelektrische Maschine, welche die erste Anregung liefern sollte, ganz weg, verband die Leitungsdrähte des Inductors, so nennt man den rotirenden Elektromagneten der Maschine, direct mit den Leitungsdrähten des feststehenden Elektromagneten und zwang so einen etwa im Inductor entstehenden Strom, auch den Elektromagneten zu umfliessen, der dadurch erst wirklich zu einem Magneten werden musste. Es schien zuerst nöthig, vor dem Gebrauch der Maschinen einen ausserhalb derselben erzeugten Strom durch den Inductor zu senden, indessen war bald die Unnöthigkeit dieses Verfahrens klar. Jeder weiche Eisenkern ist doch nicht absolut unmagnetisch, und eine Spur von dem Magnetismus, der auf irgend eine Weise, vielleicht durch den Erdmagnetismus oder auch künstlich durch einen um ihn herum gesandten Strom, in ihm erzeugt war, bleibt auch dem weichsten Eisen. Diese Spur von Magnetismus aber genügt, um bei der Drehung des Inductors einen, wenn auch noch so schwachen Strom in den Drähten desselben zu erzeugen. Dieser Strom durchfliesst bei der Siemens'schen Verbindung auch den festen Elektromagneten und macht diesen nun etwas stärker magnetisch. Dadurch wachsen dann wieder die Inductionsströme, und so verstärken sich wechselseitig die Inductionsströme und der feste Elektromagnet zu theoretisch unbegrenzten Wirkungen. Siemens nannte diese magnetoelektrische Maschine, aus der er den Magnet eliminirt hatte, dynamoelektrische Maschine. Gleichzeitig mit Siemens, und wohl auch unabhängig, kamen Murray, Varley und Wheatstone zu ähnlichen Maschinen; ein Zeichen nicht bloss dafür, wie sehr der Gedanke des dynamoelektrischen Princips in der Luft lag, sondern auch dafür, wie hoch man den Werth desselben schätzte. Dafür spricht ebenfalls, dass der Londoner Mechaniker Ladd noch im Mai 1867 auf der Londoner Ausstellung eine nach diesem Princip gearbeitete, aber mit zwei Inductoren versehene Maschine aufstellte [1]).

---

[1]) Werner Siemens experimentirte im December 1866 zum ersten Male vor mehreren Gelehrten mit seiner Maschine „ohne permanente Stahlmagnete"; Mitte Januar 1867 machte er der Berliner Akademie Mittheilung von derselben; Anfang Februar kündigte sein Bruder Wilhelm der Royal Society einen Vortrag „über die Umwandlung von mechanischer Kraft in Elektricität ohne Hülfe eines permanenten Magneten" an. Nach dieser Ankündigung, die der Gewohnheit gemäss 14 Tage vor dem Vortrage erfolgte, meldete auch Wheatstone einen Vortrag „über die Vermehrung der Kraft eines Magneten durch die Rotation von Strömen, die er selbst inducirt" an. (Jahrb. d. Erfind. IV, S. 142, 1868.) Werner Siemens sagt in der Mittheilung an die Berliner Akademie (Monatsberichte d. Berl. Akad. 1867, S. 55, eingereicht am 17. Jan. 1867; Pogg. Ann. CXXX, S. 332 u. 517) über seine Maschine: „Während die Leistung der magnetoelektrischen Inductoren nicht in gleichem Verhältnisse mit der Vergrösserung

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Auch die zweite Unvollkommenheit der dynamoelektrischen Maschinen, die stossweise Erzeugung des Stromes, hatte Siemens und zwar schon 1855 zu beseitigen versucht, doch damals noch mit geringem Erfolg [1]). Besser, weil viel einfacher, gelang dies Pacinotti [2]), dessen kleine, 1860 gebaute Maschine aber wenig kräftig, eigentlich nur Modellmaschine war und darum so gut wie keine Beachtung fand. Erst als Gramme im Jahre 1868 seine Construction (die er ohne Kenntniss Pacinotti's neu entdeckte) mit dem dynamoelektrischen Princip von Siemens verband, gelangte dieselbe, aber dann auch desto schneller, zu allgemeiner Anerkennung und Benutzung.

Pacinotti und nach ihm Gramme [3]) hatten, das war die principielle Neuerung, den Inductor statt hufeisenförmig, ringförmig gestaltet und danach auch die Pole des permanenten Magneten oder des ihn vertretenden Elektromagneten halbringförmig gebildet, so dass sie den Ringinductor so innig wie möglich einschlossen. Trotz der verschiedenen Gestalt wirkt dieser Pacinotti'sche oder Gramme'sche Ring ganz wie ein gewöhnlicher Hufeisenmagnet. Jeder Theil der Drahtspule, welche den Ring einschliesst, wird von einem gleich gerichteten Strome durchflossen, so lange er sich im Felde, d. h. in der Wirkungssphäre eines Magnetpols bewegt. Sowie er aus diesem Felde in das des nächsten tritt, kehrt sich der Strom in die entgegengesetzte Richtung um. An der Stelle, wo sich die magnetischen Felder der Pole begrenzen, wird darum der Strom der Spule nach der Achse des Ringes, die als Sammler oder Conductor dient, abgeleitet und von da nach dem festen Elektromagneten und dann durch den äusseren Stromkreis geführt. Die Leitungsdrähte, welche von den Spulen kommen, enden in Ansätzen der

---

ihrer Dimensionen zunimmt, findet bei den beschriebenen das umgekehrte Verhältniss statt. Es hat dies darin seinen Grund, dass die Kraft der Stahlmagnete in weit geringerem Verhältniss zunimmt, als die Masse des zu ihrer Herstellung verwendeten Stahles, und dass sich die Kraft einer grossen Anzahl kleiner Stahlmagnete nicht auf eine kleine Polfläche concentriren lässt, ohne die Wirkung sämmtlicher bedeutend zu schwächen oder sie selbst zum grossen Theile zu entmagnetisiren. Magnetinductoren mit Stahlmagneten sind daher nicht geeignet, wo es sich um Erzeugung sehr starker andauernder Ströme handelt ... Die Stahlmagnete verlieren ferner bald einen grossen Theil ihres Magnetismus und die Maschinen ihre anfängliche Kraft." (Pogg. Ann. CXXX, S. 334 bis 335.)

[1]) Siemens sagt über diese Maschine (Wiedem. Ann. XIV, S. 472): „Eine derartige Maschine zur Hervorbringung continuirlicher, hochgespannter Ströme für telegraphische Zwecke war von Siemens und Halske in der Londoner Industrieausstellung von 1855 ausgestellt und befindet sich gegenwärtig im hiesigen (Berliner) Postmuseum ... Der Pacinotti'sche Ring hat vor dieser den Vorzug grösserer Einfachheit und dass der allmälig vor sich gehende Polwechsel im Eisen weniger Wärme entwickelt."

[2]) Nuovo Cimento XIX, p. 378, 1865; nach Wiedemann, Lehrb. d. Elektricität, IV, S. 372. — Antonio Pacinotti aus Florenz.

[3]) Compt. rend. LXXIII, p. 175, 1871; LXXV, S. 1497, 1872. — Zénobe Théophile Gramme, zuerst Modellschreiner bei der Compagnie l'Alliance (zur Erzeugung von elektrischem Licht).

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Achse, die Enden der Stromleitung schleifen in Form von Drahtbürsten auf jenen Metallansätzen, so dass der Strom trotz der Rotation der Achse immer geschlossen ist. Da nun der ganze Ring mit Drahtspule umwickelt ist, so gehen auch durch jede Stelle des magnetischen Feldes, wenn wir von der sehr geringen Entfernung der einzelnen Spulenwindungen absehen, immer gleiche Windungen, die auf dem Collector schleifenden Bürsten nehmen also von den immer in gleicher Weise vorübergehenden Spulen gleichmässige Ströme auf, und diese durchfliessen also den äusseren Stromkreis nahezu continuirlich, d. h. ohne jede Pause. Doch ist der Ring wohl noch verbesserungsfähig. Die Inductionsströme werden um so stärker, mit je grösserer Fläche und in je grösserer Nähe sich Inductor und Elektromagnet gegenüberstehen. Es wird darum besser sein, dem Pacinotti'schen Ringe statt eines kreisförmigen einen rechteckigen Querschnitt zu geben, oder noch besser den Ring in der Richtung der Achse so auszudehnen, dass er aus einem Ringe zu einem Hohlcylinder oder einer Trommel wird. Natürlich muss dann auch der Elektromagnet in die Breite gezogen werden, so dass er mit seinen Polschuhen die Trommel innig umschliesst. Einen solchen Trommelinductor wandte zuerst der Chefingenieur der Siemens'schen Werkstätten, Friedr. v. Hefner-Alteneck, im März 1872 an [1]).

Diesen beiden Arten von Maschinen, der von Gramme und der von Hefner-Alteneck, schliessen sich nun alle neu erbauten Maschinen, die zum Erzeugen starker elektrischer Ströme dienen, an, die Anwendung des dynamoelektrischen Princips haben alle gemeinsam; die Formen der Inductoren nur sind mehrfach umgeändert oder verbessert [2]).

---

[1]) Siemens sagt über diese Construction (Wiedem. Ann. XIV, S. 473): „Der Gramme'schen elektrodynamischen Maschine haftet aber noch der Mangel an, dass nur die die magnetischen Felder durchlaufenden äusseren Theile der Drahtwindungen der inducirenden Wirkung unterliegen, während die innere Hälfte derselben ohne wesentliche Wirkung bleibt und den Widerstand der Strombahn nur nutzlos erhöht. v. Hefner-Alteneck beseitigte denselben bei der nach ihm benannten dynamoelektrischen Maschine zum grossen Theile dadurch, dass er den rotirenden Ring oder auch einen massiven Eisencylinder nur an der Aussenseite mit Windungen versah, welche gruppenweise, wie bei der Gramme'schen Maschine, mit Contactstücken und Schleiffedern oder Drahtbürsten communicirten.“ Der Vorläufer des v. Hefner-Alteneck'schen Trommelinductors war wohl der Cylinderinductor, den Siemens schon im Jahre 1857 (Pogg. Ann. CI, S. 271) beschrieben hatte.

[2]) Noch vor den Inductionsmaschinen kamen die Influenzmaschinen zur Vollendung. Gleich nach der Erfindung des Elektrophors durch Volta construirte Lichtenberg einen Doppelelektrophor aus einem Deckel und zwei Elektrophorkuchen, von denen der eine erst durch den am anderen elektrisirten Deckel geladen wurde, und einen ähnlichen Apparat gebrauchte Abr. Bennet als Elektricitätsverdoppler. Cavallo stellte die Elektrophorkuchen senkrecht und setzte den Deckel nicht direct an die Platten, sondern bewegte ihn vermittelst eines drehbaren Hebels sehr nahe an den-

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Wie alle Inductionsmaschinen sind natürlich auch die dynamoelektrischen in doppelter Weise zu gebrauchen; entweder zur Erzeugung von elektrischen Strömen durch mechanische Arbeit oder auch zur Erzeugung von mechanischer Arbeit durch elektrische Ströme. Dreht man den Inductor der Maschinen, so durchfliesst den Drahtkreis derselben ein elektrischer Strom. Sendet man umgekehrt durch diesen Drahtkreis von aussen elektrische Ströme, so rotirt der Inductor, und von dessen Achse lässt sich die Bewegung auf eine beliebige Arbeitsmaschine übertragen.

Damit ist das Problem der Kraftübertragung durch Elektricität theoretisch ganz allgemein gelöst. Denn hat man an einem Orte eine mechanische Kraft zur Verfügung, die an einem beliebigen zweiten Orte verbraucht werden soll, so braucht man nur an dem ersten Orte durch die Kraft mit Hülfe einer Dynamomaschine elektrische Ströme zu erzeugen, diese durch Drähte nach dem anderen Orte zu leiten und dort von denselben eine andere, der ersten gleiche Dynamomaschine in Bewegung setzen zu lassen. Praktisch aber wird die Verwerthung dieser Kraftübertragung fundamental von den Kraftverlusten abhängen, welche dabei unvermeidlich sind. Werner Siemens sagt in dem schon erwähnten Aufsatze über dieses Thema[1]): „Wenn man zwei dynamoelektrische Maschinen in denselben Kreislauf bringt und die eine mit constanter Geschwindigkeit dreht, so muss die andere sich als elektromagnetische Maschine in umgekehrter Richtung drehen, wie schon

---

selben vorüber; er nannte sein Instrument Multiplicator. (Gilb. Ann. IX, S. 139.) Bennet und Cavallo bemerkten auch, dass ihre Apparate (ähnlich wie die späteren Influenzmaschinen) sich von selbst ohne vorherige Elektrisirung anregten. Nicholson stellte die Elektrophorplatten aus Glasscheiben her, die er theilweise mit Silber belegte, und befestigte die bewegliche Platte mit einem Arme an einer Rotationsachse. (Gilb. Ann. IX, S. 145.) Sein Apparat, den er Revolving doubler nannte, gab kräftige Resultate und erregte lebhaftes Interesse, wurde aber über dem erstaunlichen Fortschreiten der galvanischen Elektricität vergessen. Auch ein später von G. Belli im Jahre 1831 construirter, dem Revolving doubler ähnlicher Apparat fand keine Beachtung. (Annali di Scienze del reg. Lomb. Venet. 1831, p. 11; Albrecht, Gesch. d. Elektr. S. 58.) Erst nachdem Faraday durch seine Theorie der statischen Influenz das Interesse der Physiker wieder mehr zugewendet, folgte auch schnell die vollständigere Entwickelung dieser Maschinen. Die erste derselben beschrieb Prof. Töpler (damals in Dorpat, später in Dresden) im Jahre 1865 (Pogg. Ann. CXXV, S. 469; Rigaer Zeitung vom 7. Januar 1865). Unabhängig und fast gleichzeitig kam A. W. Holtz (geb. 15. October 1836, Prof. in Greifswald) zu einer wesentlich einfacheren Construction, die trotzdem stärkere Wirkungen gab. (Pogg. Ann. CXXVI, S. 157). Töpler betonte im Jahre 1867 (Pogg. Ann. CXXVII, S. 178), dass „durch den Influenzapparat vielleicht der unmittelbarste Weg angedeutet sein dürfte, durch mechanische Arbeit elektrische Wirkungen zu erzielen". Poggendorff aber führte 1869 (Pogg. Ann. CXXXIX, S. 513) mit Holtz'schen Influenzmaschinen ähnliche Kraftübertragungen aus, wie man sie jetzt durch gekoppelte Dynamomaschinen bewirkt.

[1]) Wiedem. Ann. XIV, S. 473 bis 479, 1881.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

aus der Betrachtung folgt, dass eine dynamoelektrische Maschine eine in umgekehrter Richtung gedrehte elektromagnetische Maschine ist. Der Gegenstrom, den diese durch den Strom rotirende Maschine erzeugt, schwächt nun den durch die primäre dynamoelektrische Maschine erzeugten Strom und vermindert dadurch zugleich auch die Arbeit, welche zur Drehung der letzteren erforderlich ist. Hätte die secundäre Maschine weder innere noch äussere Arbeit zu verrichten, so würde sich ihre Geschwindigkeit so weit steigern, bis ihre elektromotorische Gegenkraft der der primären Maschine das Gleichgewicht hielte. Es würde dann kein Strom mehr durch die Leitung gehen, aber auch weder Arbeit consumirt noch geleistet. Vollständig kann dieser Gleichgewichtszustand niemals erreicht werden, weil die secundäre Maschine innere Widerstände zu überwinden hat und weil die primäre Maschine eine von ihrer Construction abhängende Geschwindigkeit erreichen muss, bevor der dynamoelektrische Verstärkungsprocess des Stromes seinen Anfang nimmt. Wird der secundären Maschine nun eine Arbeitsleistung aufgebürdet, so vermindert sich dadurch ihre Geschwindigkeit. Mit dieser vermindert sich die von der Rotationsgeschwindigkeit abhängige Gegenkraft, und es durchläuft nun beide Maschinen ein der Differenz ihrer elektrischen Kräfte entsprechender Strom, dessen Erzeugung Kraft verbraucht, und der seinerseits in der secundären Maschine die ihr auferlegte Arbeit leistet. Ich habe bereits an anderen Orten darauf hingewiesen, dass der bei dieser Kraftübertragung erzielte Nutzeffect keine constante Grösse ist, sondern von dem Verhältnisse der Geschwindigkeit beider Maschinen abhängt, und dass er mit der Rotationsgeschwindigkeit derselben wächst. Durch die nachfolgend beschriebene Untersuchung hat sich dies innerhalb gewisser Grenzen bestätigt. Praktisch ist bisher ein Nutzeffect bis zu 60 Proc. der aufgewendeten Arbeit erzielt worden, und es sind mit den grössten zur Verwendung gekommenen Maschinen — die allerdings nicht speciell für Kraftübertragung, sondern für Beleuchtungszwecke construirt waren — bis zu 10 mit dem Prony'schen Zaume gemessene Pferdekräfte übertragen worden, mit einem Nutzeffecte von durchschnittlich 50 Proc. Es wird hiernach bei der elektrischen Kraftübertragung bisher nur etwa die Hälfte der aufgewendeten Arbeit als Nutzarbeit wieder gewonnen, während die Hälfte zur Ueberwindung der Maschinen- und Leitungswiderstände verbraucht und in Wärme umgewandelt wird. Die Grösse dieses Kraftverlustes ist offenbar von der Construction der Maschine abhängig. Wäre keine Aussicht vorhanden, durch Verbesserung dieser Constructionen eine wesentliche Verminderung desselben herbeizuführen, so würde die technische Verwendung der elektrischen Kraftübertragung eine einigermaassen beschränkte bleiben. Es ist daher von Wichtigkeit, die in der Maschinenconstruction liegenden Ursachen des Kraftverlustes festzustellen und dann in Betracht zu ziehen, ob und auf welchem Wege eine gänzliche oder theilweise Beseitigung dieser Verlustquellen anzubahnen ist. Es können hierbei die rein mecha-

nischen Kraftverluste durch Reibungen, Luftwiderstand, Stösse etc. in den Maschinen ausser Betracht gelassen werden. Sie bilden nur einen kleinen Theil des Verlustes, und ihre möglichste Verminderung ist durch Anwendung bekannter Constructionsgrundsätze herbeizuführen. Die wesentliche und niemals ganz zu beseitigende physikalische Ursache des Kraftverlustes ist die Erwärmung der Leiter durch den elektrischen Strom . . . Diesen Ursachen ist auch die auffallende Erscheinung zuzuschreiben, dass die Stromstärke der in sich geschlossenen Dynamomaschine nach Beendigung des Steigerungsprocesses der Drehungsgeschwindigkeit nahe proportional ist, während das dynamoelektrische Princip an sich (d. h. ohne Berücksichtigung der Erwärmung der Drähte, der secundären Wirkung der inducirten Ströme u. s. w.) bei jeder Drehungsgeschwindigkeit ein Ansteigen des Stromes bis zu derselben unendlichen Höhe bedingt, wenn der Magnetismus der Stromstärke proportional ist. Ob und in wie weit eine Vervollkommnung der Construction der dynamoelektrischen Maschinen die geschilderten Mängel derselben zu beseitigen im Stande ist, lässt sich theoretisch nicht feststellen."

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

Eine Zeit lang hat man noch besondere Hoffnungen auf eine andere Art der Kraftübertragung gesetzt, die allerdings mehr auf eine Aufspeicherung, Concentrirung und danach Mobilisirung derselben hinauslief. Stellt man zwei Bleiplatten in ein Glas, das mit recht verdünnter Schwefelsäure angefüllt ist, und verbindet diese Bleiplatten mit den Poldrähten einer dynamoelektrischen Maschine, so verändern sich die Bleiplatten, sowie die Maschine in Bewegung gesetzt wird, durch die chemische Einwirkung des hindurchgehenden Stromes; die Platte, in welche der positive Strom eintritt, bedeckt sich nach und nach mit einem braunen Ueberzug, der aus einer pulverförmigen Bleiverbindung, Bleisuperoxyd, besteht, während die andere eine graue Oberfläche von reinem körnigen Blei bekommt. Diese so geladenen Platten kann man, nachdem ihre Verbindung mit der Maschine unterbrochen, längere Zeit aufheben, ohne dass ihre Oberflächen sich wieder verändern. Verbindet man sie aber zu beliebiger Zeit unter sich durch einen Leitungsdraht, wie die Pole eines galvanischen Elementes, so zersetzt sich der chemische Ueberzug wieder, die Platten werden wieder gleich, die hierbei frei werdende chemische Kraft setzt sich wieder in Elektricität um, woraus sie entstanden war, und den Leitungsdraht durchfliesst ein Strom, der zwar kürzere Zeit dauert, als der zuerst angewandte Ladungsstrom, dafür aber auch eine grössere elektromotorische Kraft besitzt. Die Bekanntschaft mit solchen Wirkungen der Elektricität geht bis auf den schon genannten Ritter um das Jahr 1802 zurück, und in der That sind ja solche sogenannte secundäre Elemente seit jener Zeit vielfach construirt, und ihre Theorie ist, wie erwähnt, schon vor Schönbein genügend entwickelt worden. Zu Bleiplatten aber und in zweckmässiger Form, d. h. spiralig aufgewunden, damit man grosse Oberflächen in kleine Gefässe

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.

bringen kann, griff zuerst Planté[1]) im Jahre 1860, und erst nach Camillo Faure's[2]) Verbesserung oder nur Veränderung dieser secundären Elemente oder Accumulatoren erfuhren dieselben entsprechende Beachtung. Der Enthusiasmus aber, welcher durch diese Accumulatoren das Problem der bis ins Kleinste gehenden Theilung und der beliebigen Uebertragbarkeit der Elektricität gelöst glaubte, der da hoffte, „die Elektricität wie Pomade in Büchsen verkaufen zu können", hat sich doch schon wieder gelegt. Die Accumulatoren versprechen allerdings eine noch allgemeinere Lösung des Problems der Uebertragung der Kraft als die Dynamomaschine; sie ermöglichen nicht nur eine örtliche Uebertragung, sondern sogar eine zeitliche. Indessen sind sie für die erstere durch ihre Schwere, die bei ihrer Bewegung wieder Arbeitsverluste herbeiführt, den Dynamomaschinen gegenüber in sicherem Nachtheil, wozu noch kommt, dass die Kraftverluste auch ohne das in den Accumulatoren noch ebenso gross sind als in jenen. Für die zeitliche Kraftübertragung aber, bei der eine Concurrenz der Dynamomaschinen nicht möglich ist, haben sie den Nachtheil, dass die Dauer ihrer Wirksamkeit eine viel zu kurze ist und nicht über einige Tage hinausreicht. Sie sind darum auch hier nur brauchbar, wenn man es mit intermittirenden Kräften oder auch nur mit Kraftquellen von sehr veränderlicher Stärke zu thun hat.

Muss man danach zu dem Resultate gelangen, dass die Aufgabe der elektrischen Uebertragung der Kraft jedenfalls noch nicht zu einer eigentlichen Lösung gelangt, sondern erst in den Anfängen derselben begriffen ist, so taucht die Frage auf, wie es möglich ist, dass die Elektrotechnik zu einer so schnellen Entwickelung und allgemeinen Anerkennung gelangte, während doch ihr eigentliches Ziel noch weit in der Ferne liegt. Den Grund dafür wird man vor Allem in einer Krafttransformation, in der Verwandlung der Elektricität in Licht finden, und noch lange wird gerade diese Krafttransformation die treibende Kraft und das praktisch nutzbare Moment in dem allgemeinen Problem der Kraftübertragung bilden. Indessen ist gerade die Entwickelung dieser Umsetzung von Elektricität in Licht, seit man den Davy'schen Lichtbogen, wie das Glühen der Lichtdrähte kannte, so wenig Sache der Theorie geblieben und so sehr Sache der Technik geworden, dass wir hier nicht näher darauf einzugehen brauchen und auch nicht näher darauf eingehen können.

Nur eine Seite müssen wir noch hervorheben. Das Eigenthümlichste an der Elektricität ist ihre Schrankenlosigkeit im Raume, wenigstens so weit das irdische Räume betrifft. Mit ihrer Hülfe hört, spricht und tastet der Mensch direct in die weiteste Ferne,

---

[1]) Gaston Planté (1834—1889, Schüler von A. C. Becquerel): Compt. rend. L, p. 640, 1860; Pogg. Ann. CIX, S. 655.

[2]) Compt. rend. XCII, p. 951, 1882.

übt er unbeirrt durch weite Strecken auf jede Entfernung hin starke Kräfte aus, leistet er schwere Arbeiten. Ja, wenn unsere Geruchs- und Geschmacksempfindungen durch besondere Bewegungen der auf unsere Sinne einwirkenden Materien hervorgebracht werden, ist kein nothwendiges Hinderniss zu sehen, warum nicht auch solche Empfindungen durch die Elektricität übertragen werden sollten. Die Elektricität ist so in Concurrenz mit dem Licht, das ihr so nahe verwandt ist, getreten und lässt dem Menschen die Hoffnung erstehen, dass er von den Schranken des Raumes sich immer mehr befreien und endlich irdischer Allgegenwart wenigstens sich nähern könnte. Unabhängigkeit von den Schranken des Raumes bedingt aber immer auch in bestimmter Weise die Unabhängigkeit von dem Flusse der Zeit, und so zeigt uns der mit der Entwickelung der Wissenschaft parallel sich vollziehende Fortschritt der Technik eine ohne Grenzen sich erweiternde Herrschaft über die Natur und alle ihre Gewalten und damit das unwiderlegliche Vorwärtsschreiten des Menschengeschlechtes auf dem Wege zu immer grösserer Vollkommenheit.

Theorie der Elektricität, Elektrotechnik, c. 1860 bis c. 1880.



# NAMENREGISTER.

(Mit biographischen Ergänzungen. Die Stellen, an denen biographische Notizen sich befinden, sind durch ein Sternchen * bezeichnet.)

## A.



## B.

## C.

## D.

## H.

## I.



## J.



## K.



## L.

## N.



## O.



## P.

## T.

## U.



## V.



## W.

## Y.



## Z.

# SACHREGISTER.

## D.



## E.

F.



G.



H.



I.



K.

## L.



## M.



## N.



## O.



## P.

Q.



R.



S.



T.

## U.



## V.



## W.



## Z.



